

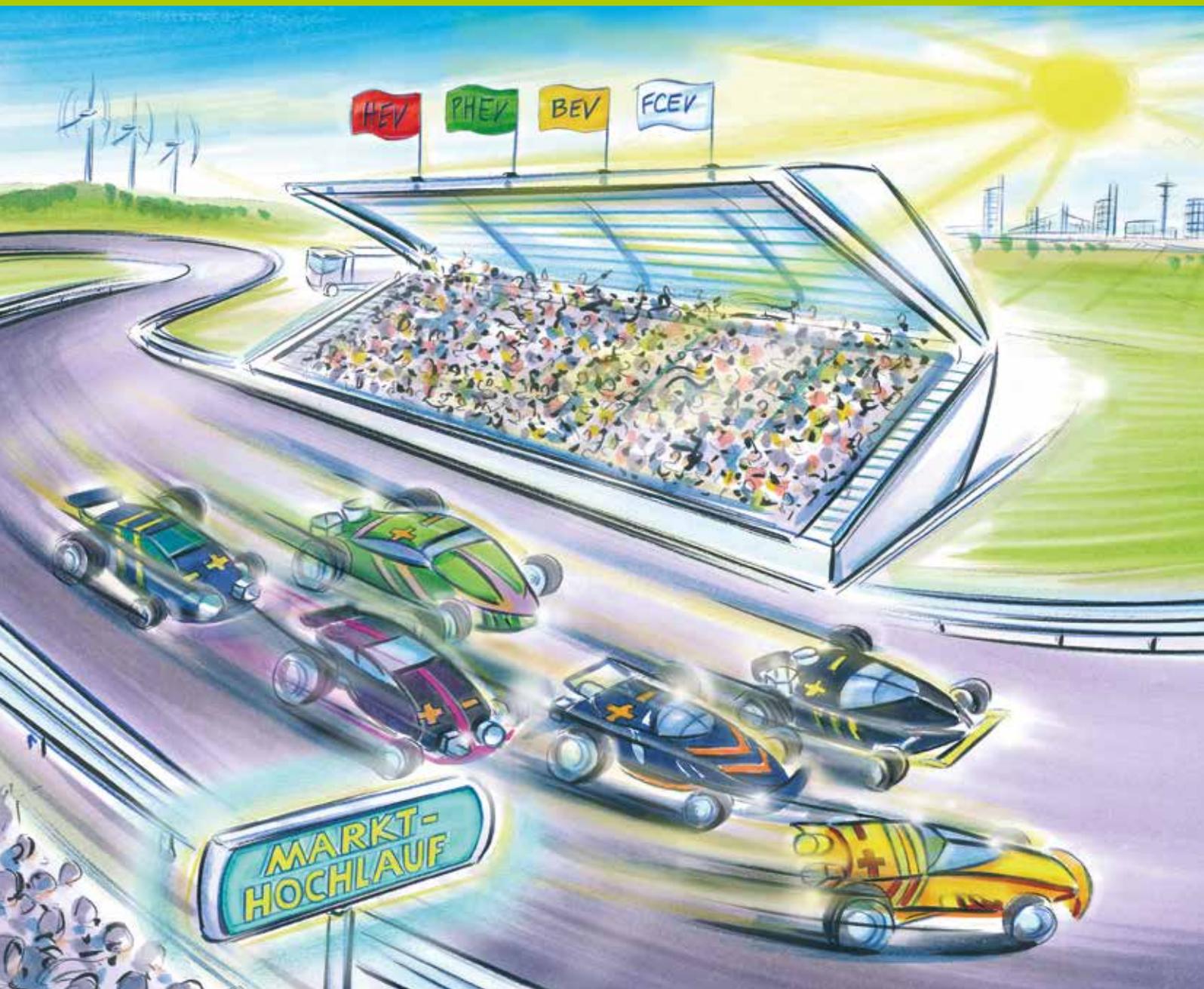


Fraunhofer

ISI

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI

PRODUKT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030



VORWORT



Angesichts der stetig wachsenden Weltbevölkerung und dem gleichzeitig steigenden Bedarf nach Mobilität wird die Dringlichkeit, Lösungen für knapper werdende Ressourcen und den zunehmenden Klimawandel zu finden, immer größer. Es gibt somit keine Alternative mehr zur Dekarbonisierung des gesamten Verkehrssektors: Emissionsarme und -freie Verkehrsmittel bzw. die Elektromobilität werden nicht mehr aus der öffentlichen Aufmerksamkeit verschwinden. Selbst wenn der Ölpreis dauerhaft niedrig bleiben sollte¹, steigt angesichts von z. B. Lärm und Smogproblemen in Großstädten und Ballungszentren sowie zunehmender Umweltkatastrophen weltweit der Druck auf Politik und Wirtschaft, von den fossilen Brennstoffen wegzukommen.

In Deutschland steht nach wie vor das Ziel der Bundesregierung auf der Agenda, den Wirtschaftsstandort bis zum Jahr 2020 zum Leitanbieter von und Leitmarkt für Elektromobilität zu machen. Um den Markthochlauf zu beschleunigen, sind Marktanreize wie Sonderabschreibungen für gewerblich genutzte Elektrofahrzeuge und ein öffentliches Beschaffungsprogramm im Gespräch.² Große Bedeutung kommt allerdings auch der zukünftigen Forschung und Entwicklung an leistungsfähigen, zuverlässigen Energiespeichern für die Elektromobilität zu, mit niedrigen Kosten, hoher Reichweite und Sicherheit.

Die vorliegende „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ fokussiert deshalb auf rein batterieelektrische (BEV), Plug-in Hybride (PHEV) und Hybridelektrofahrzeuge (HEV) als Innovationstreiber für die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterietechnologie. BEV stellen dabei den mit Abstand

wichtigsten Markt für Hochenergie-Lithium-Ionen-Batteriezellen dar. Gegenüber heute zumeist kostenoptimierten Modellen mit relativ geringer Reichweite zeigt die Roadmap einen Weg für eine reichweitenoptimierte, aber gleichzeitig für den Massenmarkt bezahlbare Elektromobilität für die kommenden zehn bis zwanzig Jahre auf. Auf Basis der bisherigen Entwicklung von Batteriekapazitäten, Kostenentwicklungen, Reichweiten der Fahrzeuge etc. wird die Entwicklung zentraler technischer Leistungsparameter verifiziert und fortgeschrieben. Anhand der Kriterien Kosten, Reichweite und Infrastruktur (z. B. Tanken/Laden) können die heute vorliegenden Ansätze der Elektrofahrzeuge vergleichend bewertet und für die Zukunft fortgeschrieben werden. Daraus ergibt sich ein realistisches Zukunftsbild, das es erlaubt, Aussagen über förderliche Rahmenbedingungen abzuleiten, um die Realisierung des Systemwandels Elektromobilität in jeder Phase zu unterstützen.

Der weitere Markthochlauf und die anschließende breite Diffusion der Elektromobilität sind verbunden mit einem gewaltigen Marktpotenzial für zukünftige Automobilhersteller und Zulieferer. Schon bis 2050 könnte sich ein tiefgreifender Wandel hin zu einer reinen Elektromobilität vollziehen. Die hohe Wertschöpfung des Automobilsektors sollte dabei im „Land des Automobils“ gehalten und ggf. sogar ausgebaut werden. Von der Elektromobilität könnten in Deutschland zahlreiche Akteure auf fast allen Wertschöpfungsstufen profitieren. Jedoch ist Planungssicherheit ein wichtiger Faktor für alle direkt und indirekt betroffenen Unternehmen.

Die vorliegende Roadmap soll daher allen Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik sowie der interessierten Gesellschaft als Orientierung dienen, um ausgehend vom heutigen Status Quo der Elektromobilität ein Zukunftsbild zu liefern, mit welchem auch in den kommenden Jahren überprüft werden kann, welchem Pfad die Elektromobilität folgen wird und welche Konsequenzen sich hierdurch für die Mobilität der Zukunft ergeben.

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka
Präsident des Karlsruher Instituts für Technologie KIT

EINLEITUNG

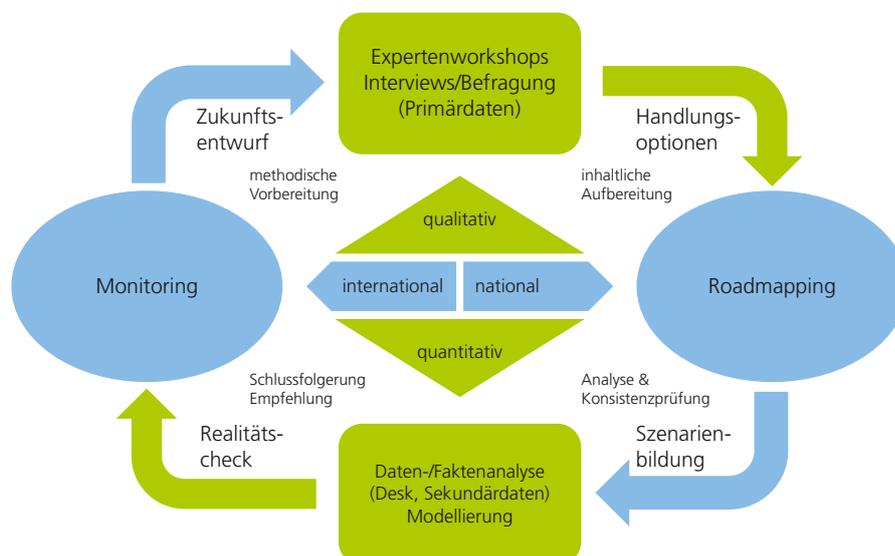
PRODUKT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

Die „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ befasst sich mit der Entwicklung von Elektrofahrzeug-Konzepten und der Marktentwicklung der Elektromobilität aus der Perspektive der noch offenen Entwicklungspotenziale von Elektrofahrzeug-Batterien. Somit stehen die technische Entwicklung und der Markthochlauf von rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), Plug-in Hybriden (PHEV) und Hybridfahrzeugen (HEV) im Mittelpunkt der Roadmap. Diese gelten als Innovations-treiber für die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterie (LIB) mit den höchsten Anforderungen insbesondere an Energiedichte und Kosten der Batterien. BEV stellen den mit Abstand wichtigsten Markt für Hochenergie (HE)-LIB-Zellen dar. Gegenüber heute kostenoptimierten Modellen von Elektrofahrzeugen mit typischerweise rund 25kWh Batteriekapazität aber nur 150 bis 200 Kilometer Reichweite sowie dem Ansatz von Tesla Motors Inc. mit 60 bis 100kWh Batteriekapazität und 300 bis 600 Kilometer Reichweite, jedoch Fahrzeugkosten von 70 000 bis 100 000€ zeigt die Roadmap einen Weg für eine reichweitenoptimierte und bezahlbare und damit Massenmarktaugliche Elektromobilität für die kommenden 10 bis 20 Jahre und später auf.

Dabei werden fördernde und hemmende Rahmenbedingungen für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen in diesem Zeitraum identifiziert und diskutiert. Auf Basis der bisherigen Entwicklung von Batteriegrößen, Reichweiten der Fahrzeuge, Kostenentwicklungen, Einführung und Ankündigung von Elektrofahrzeug-Modellen etc. wird die Entwicklung zentraler technischer Parameter verifiziert und fortgeschrieben. Anhand der Kriterien Kosten, Reichweite und Infrastruktur (z. B. Tanken/Laden) können die heute vorliegenden Ansätze der Elektrofahrzeuge somit vergleichend bewertet werden. Daneben wird die Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen (FCEV) in den Kontext gesetzt. Diese werden heute noch als alternative Technologie mit hoher Reichweite eingestuft. Mit einer reichweitenoptimierten, Batterie-basierten Elektromobilität werden sich batterieelektrische und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge jedoch in absehbarer Zeit zu konkurrierenden Konzepten entwickeln.

VORGEHEN UND METHODIK

Der Erstellung aller Roadmaps liegt ein methodisch gestütztes Vorgehensmodell zugrunde. Hierbei werden qualitative und quantitative Forschungsmethoden kombiniert. Ebenso erfolgt jeweils (soweit möglich) ein Abgleich der nationalen (bzw. teil-



weise EU-) Perspektive der Roadmap mit internationalen Entwicklungen, wodurch das Roadmapping durch ein Monitoring ergänzt und gestützt wird.

Das Vorgehen folgt den in der Abbildung angedeuteten vier Schritten: In einem ersten Schritt wird auf Basis von Desk-Recherchen und Studienanalysen ein Rahmen für einen Zukunftsentwurf methodisch vorbereitet, welcher die Roadmap-Architektur darstellt und in Expertenworkshops (mit typischerweise 10 bis 20 für den Abdeckungsbereich der Roadmap einschlägigen Experten aus Wissenschaft und Industrie) inhaltlich erarbeitet wird. Hierdurch wird eine interaktive Diskussion und Konsensbildung ermöglicht. Vertiefende Expertengespräche gehen der Roadmap-Entwicklung teilweise voraus oder werden bei offenen Fragen im Nachgang geführt. In einem zweiten Schritt wird die Roadmap erstellt und visualisiert. Handlungsoptionen können schließlich aktEURsspezifisch abgeleitet werden. In einem dritten Schritt folgt eine Analyse und Konsistenzprüfung (z. B. durch Publikations-, Patentanalysen, Technologie- und Marktstudien etc.) sowie ggf. eigene Modellberechnungen, um die Aussagen der Roadmap über eine Szenarienbildung quer zu prüfen bzw. neben der qualitativen Experteneinschätzung auch quantitativ abzustützen und möglichst zu bestätigen. In einem vierten Schritt erfolgt schließlich der Abgleich realer/aktueller Entwicklungen (z. B. erreichte Leistungsparameter, Beobachtung der Marktentwicklung) mit den aus der Roadmap abgeleiteten Handlungsoptionen. Die Verknüpfung mit dem (internationalen) Monitoring ist wichtig, um für Deutschland bzw. aktEURsspezifisch zugeschnittene Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen ableiten zu können.

KERNAUSSAGEN

Kostenoptimierte Elektrofahrzeuge mit jedoch geringer Reichweite können noch in den kommenden Jahren für bestimmte erste Zielgruppen und Einsatzzwecke attraktiv sein. Gleiches gilt für hochpreisige Elektrofahrzeuge mit hoher Reichweite wie z. B. von Tesla Motors Inc., welche bis 2020 einen Einstieg als kostenreduzierte Fahrzeuge für die breitere Bevölkerung versuchen. Denn um die Elektromobilität massenmarktauglich zu machen, müssen Elektrofahrzeuge hinsichtlich Kosten, Reichweite und Infrastruktur (z. B. Tanken/Laden) mit dem heutigen Status quo, dem konventionellen Fahrzeug mit Verbrenner, konkurrenzfähig werden.

Durch die schrittweise Erhöhung von Reichweiten durch Verbesserung der Batterietechnik ebenso wie ingenieurstechnische Verbesserungen des Energieverbrauchs der Elektrofahrzeuge können bis 2030 Fahrzeuge entwickelt werden, welche dem kostenoptimierten Pfad folgen, schließlich aber in den Bereich

von Reichweiten herkömmlicher Automobile mit Verbrennungsmotor kommen und zudem schnell aufgeladen werden können. Der Vorteil des Tesla Motors Inc.-Ansatzes würde demnach nur noch in den nächsten 10 bis maximal 15 Jahren aufrechterhalten sein. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“, welche aufzeigt, dass in demselben Zeitraum der technische und ökonomische Abstand von großformatigen gegenüber kleinformatigen LIB-Zellen geschlossen werden und eine neue Generation großformatiger LIB-Zellen technisch ausgereift sein kann.

In diesen Zeitraum dürften aber der Markthochlauf (von heute rund 0,5 Prozent der BEV an weltweiten PKW-Neuzulassungen auf rund 1 bis 2 Prozent um 2020, rund 2 bis 8 Prozent um 2025 und ggf. 5 bis 15 Prozent um 2030) und die anschließende breite Diffusion der Elektromobilität fallen, verbunden mit den Marktpotenzialen die sich hieraus für zukünftige Automobilhersteller und Zulieferer ergeben.

Für Deutschland bedeutet dies, dass bis 2020 rund 200 000 bis 300 000 und bis 2030 über 1 bis 3 Millionen Elektrofahrzeuge zu dem PKW-Bestand beitragen könnten. Innerhalb einer Fahrzeuglebensdauer (10 bis 20 Jahre) könnte sich dann bis 2050 ein Wandel zur reinen Elektromobilität vollziehen. Entsprechend gestaltete Rahmenbedingungen (z. B. monetäre und nicht monetäre Anreize bei einem Fahrzeugkauf aber auch infrastrukturelle Maßnahmen etc.) können eine solche Entwicklung natürlich beeinflussen und auch regional werden sich klare unterschiedliche Entwicklungen zeigen. Jedoch wird deutlich, dass insbesondere zwischen 2020 und 2030 rahmensetzende Maßnahmen besser greifen dürften. Kurz- bis mittelfristig sollte im Rahmen vorbereitender Maßnahmen vielmehr ein Fokus auf die technische und ökonomische Ausreifung der Batterie- und Elektrofahrzeugtechnologien durch Unterstützung der FuE, ein breiteres Fahrzeugangebot und deutlich tieferes Verständnis der Marktentwicklungen, Geschäftsmodelle und sich ableitender infrastruktureller und regulatorischer Unterstützungsoptionen sowie die Kommunikation der Entwicklungsrichtungen und -fortschritte gegenüber der Öffentlichkeit gelegt werden.

Die Elektromobilität wird in den kommenden Jahrzehnten zu einem umfassenden, globalen Systemwandel nicht nur in der Automobilindustrie führen und die Batteriezelle wird darin eine Komponente unter vielen darstellen und einen Teil der Wertschöpfung erzielen. Elektromobilität und Wertschöpfungspotenziale insgesamt sind aber viel komplexer. Ebenso vielfältig sind aber auch die sich daraus ergebenden Chancen für innovative Entwicklungen.

PRODUKT-ROADMAP ENERGIESPEICHER FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT 2030

ZEIT →		2015			KURZFRISTIG	MITTLFRISTIG
RAHMENBEDINGUNGEN	Regulierung/Gesetzgebung	CO ₂ -Gesetzgebung EU: Neuwagen-Flottendurchschnitt von 130 g CO ₂ /km in 2015		Bestimmungen für Batterietransport auf Straße	Sonderrechte (kommunal, Leuchttürme)	CO ₂ -Gesetzgebung EU: „Super credits“ für schadst.-freie Fzg. (unter 50 g CO ₂ /km)
	Preisentwicklungen	Benzin 1,30-1,60 €/l	Haushaltsstrom: 0,29 €/kWh (2015, Mittelwert)	Batterien: >300 €/kWh (Endkunde, System) <200 €/kWh (OEM, Zellen)		Preise für Batterien und Elektrofahrzeuge sinken
	Infrastruktur	Standardisierte Ladeinfrastruktur		Aufbau der Ladeinfrastruktur für PHEV/BEV (privat)		Netzintegration/dyn. Stromtarife Aufbau (mittelfristig)... Öff. Ladestationen
	Normen/Standards	Ladestecker-/Sicherheitsnorm		Genormte Zellen für HEV-/PHEV-/BEV-Batteriemodule		Harmonisierung der Gesetzgebung Verschärfte Testbedingungen
	Kundenakzeptanz	Sicherheit des Fahrzeugs	Sicherstellung Strom aus Ern. Energien	Monetäre Kaufanreize (z. B. über Steuern)	Nicht-monetäre Kaufanreize (z. B. Busspurnutzung)	Neue Mobilitätskonzepte, breitere Angebote, sinkende xEV-Preise
	Fahrzeugangebot	Eigene xEV Plattformen und „purpose Design“ (auch für gewerbl. Anwend.)			Fahrspaß/Design/Alltagstauglichkeit	Zunehmende Breite des Fahrzeug-Angebots
ANWEND. & PRODUKTE	BEV (LIB) (Kosten- und Reichweiteoptimiert)	15-30 kWh (und mehr), Energiedichte ++, Reichweite (nominal) 150-250 km		~200-250 Tsd. je ~25 kWh, 5-7 GWh 200-300 kg, 5-8 km/kWh, 150-250 km		Technologische Ausdifferenzierung: Optimierung von Kosten oder Reichweiten
	PHEV (LIB)	5-20 kWh, Energie-/Leistungsdichte ++, Reichweite (nominal) 30-80 km		~200-250 Tsd. je ~10 kWh, 2-3 GWh 100-200 kg, 3-6 km/kWh, 30-80 km		Breiteres Angebot und Technologiereifung
	HEV (NiMH, LIB)	0,5-1 kWh, Leistungsdichte ++, Reichweite (nominal) ~5-8 km		~1,5 Mio je ~1 kWh, 1-1,5 GWh ~20 kg, 5-8 km/kWh, 5-8 km		Beginn der Sättigungsphase
	FCEV (H ₂ /PEM 700 bar + LIB)	Hauptleistung durch BZ (100-200 kWh), Spitzenlast 1-2 kWh (Hybridspeicher)		~Hunderte, 100-200 kg-System, 3-7 kg H ₂ , ~4 km/kWh, 400-800 km		Übergang von Demonstrationsprojekten (Busse, PKW etc.) zu Kleinserien
PRODUKTANFORDERUNGEN		BEV	PHEV	HEV		
	Energiedichte (Wh/kg) (System)	70-110 total	60-80	30-50	Energiedichte (Wh/kg und Wh/l) mit optimierter LIB erhöhen Verlustfaktoren Material → Zelle → System reduzieren	
	Leistungsdichte (W/kg) (System)	300-600	500-1.500	1.000-2.000	Status quo bzw. Verbessern	
	Lebensdauer (kalendarisch und zyklisch)	8-10 Jahre 1.000-2.000	8-10 Jahre 4.000-5.000	8-10 Jahre 15.000-20.000	10-15 Jahre Zyklenzahl erhöhen	
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)	Tief: -25 °C Hoch: +50 °C	Tief: -25 °C Hoch: +50 °C	Tief: -25 °C Hoch: +50 °C	Status quo bzw. Verbessern	
	Sicherheit (EUCAR-Level)	≤4	≤4	≤4	Status quo bzw. Verbessern	
	Kosten (System, €/kWh)	300-600	400-700	800-1.200	Kosten (BEV/PHEV) bis 2020 senken mind. auf 200-250 €/kWh System, 150-200 €/kWh Zelle	
HEUTE / 2015						

Bedeutung der Parameter und Änderung 2020-2030
 0 neutral + wichtig
 ++ sehr wichtig +++ entscheidend

2020			LANGFRISTIG			2030		
Recycling von Batterien/ Entsorgung			CO ₂ -Gesetzgebung EU: Neuwagen-Flottendurchschnitt von 95 g CO ₂ /km in 2021		Sonderrechte (kommunal, Leuchttürme)	„Second life“ von Fahrzeug-Batterien		
			Benzin >1,80 €/l	Strom <0,3 €/kWh	Batteriepreise fallen stark			
			Benzin ähnl. 2015	Strom >0,3 €/kWh	Batteriepreise sinken nicht weiter			
... und Ausbau (langfristig) halböffentliche und öffentliche Ladeinfrastruktur						Intelligente Ladeinfrastruktur (V2G)		
Öff. Schnellladestationen		Komfortladen		Ladeinfrastruktur (privat)		Indukt. Laden? ▶		
Anpassung Batterienormen								
Erhöhte Reichweite, Lebensdauer, Ladeinfrastruktur		Restwertkalkulation (u. a. Batterie)		Kosten, Reichweite, Ladeinfrastruktur deutlich verbessert (Annäherung an Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor) → Wirtschaftlichkeit für Massenmarkt in Aussicht				
Neue Geschäftsmodelle		Recyclingprozess und Rücknahme läuft problemlos		Zunehmende Konsolidierung von Fahrzeug-, Nutzungs- und Geschäftsmodellen				
~0,5-1,5 Mio je ~25-40 kWh, 20-60 GWh 100-200 kg, 8-10 km/kWh, 250-400 km			Technologiereifung und Diffusionsbeginn			~5-10 Mio je ~25-60 kWh, 0,1-1 TWh 80-200 kg, 12-14 km/kWh, 300-700 km		
~0,5-1,5 Mio je ~10 kWh, 5-15 GWh ~100 kg, 4-7 km/kWh, 50-100 km			Diffusion und Beginn der Sättigung			~1-5 Mio je ~10 kWh, <100 GWh 50-80 kg, 5-8 km/kWh, >100 km		
~1 Mio je ~1 kWh, ~1 GWh (NiMH und LIB)			Sättigung bzw. Rückgang der Nachfrage			<1 Mio je ~1 kWh, < GWh (LIB dominiert)		
~Tsd. bis 100 Tsd. (Bestand) Herausforderung H ₂ - und Tankinfrastruktur (Kosten)			Entscheidung, ob Komplementär oder Konkurrenztechnologie zu BEV ("grüne" Wasserstoffwirtschaft?)			Koexistenz (Langstrecke) oder Einsatz jenseits PKW?		
BEV	PHEV	HEV				BEV	PHEV	HEV
++	++	0	Faktor >2 gegenüber 2015			+++	++	+
+	++	++	Status quo bzw. Verbessern			+	++	++
++ ++	++ ++	++ ++	10-15 Jahre Zykluszahl erhöhen			++ ++	++ ++	++ ++
+	+	0	Status quo bzw. Verbessern			+	+	0
++	++	++	Status quo bzw. Verbessern			++	++	++
++	++	+	Kosten halbieren von 2020 bis 2030			+++	+++	+
2020			LANGFRISTIG			2030		
Neuzul./Jahr* (xEV), Batteriekapazität (kWh), Batteriemarkt/Welt (GWh), Batteriegewicht (kg), Verbrauch (km/kWh), Reichweite (km)			Aspekt wirkt sich stark förderlich für die Elektromobilität aus		Aspekt wirkt sich förderlich für die Elektromobilität aus	Aspekt ist neutral für die Elektromobilität	Aspekt wirkt sich hemmend auf die Elektromobilität aus	Aktueller Stand bzw. Stand der Technik

*) Für Deutschland geschätzt: ~ 5 % der weltweiten Neuzulassungen

ANFORDERUNGEN AN FAHRZEUGBATTERIEN

Mit der Entwicklung und dem Markteintritt erster Elektrofahrzeuge jenseits von Pilotkonzepten und Demofahrzeugen haben sich in den vergangenen Jahren auch immer deutlicher die Leistungsprofile und damit Anforderungen an Elektrofahrzeug-Batterien entwickelt.

Produktanforderungen

Diese (Mindest-)Anforderungen an die Leistungsparameter von Elektrofahrzeug-Batterien (Angaben hier auf Systemebene) sind in der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ für BEV (>20 kWh-Batterie, die Spannbreite beginnt aber auch darunter, z. B. 15 kWh und reicht bis 100 kWh im PKW-Segment), PHEV (5–20 kWh) und HEV (<3 kWh) mit Stand 2015 verortet. Sie dienen dort als Voraussetzung bzw. Mindeststandards für die Entwicklung zukünftiger Elektrofahrzeug-Batterien. Die Gesamt-Roadmap zeigt, dass eine optimierte (Hochenergie)-Lithium-Ionen-Batterie (LIB) die besten Chancen hat, das Anforderungsprofil insbesondere für PHEV und BEV zukünftig insbesondere hinsichtlich der Energiedichte und Kosten noch zu steigern.

Im Gegenteil würden aus heutiger Sicht nächste Generationen von LIB bzw. Post-LIB wie Lithium-Schwefel- (Li-S) oder Lithium-Feststoff-Batterien (Li-Feststoff) sogar zur Verschlechterung in einzelnen Parametern führen, ohne eine deutliche Verbesserung in Schlüsselparametern wie den Kosten und der Energiedichte zu erzielen bzw. für die heutigen Fahrzeugkonzepte zumindest bis 2030 einsatzfähig zu sein. Daher wird für die vorliegende Produkt-Roadmap und für den hier betrachteten Zeitraum bis 2030 stets von einer optimierten LIB in Einklang mit den in der Gesamt-Roadmap beschriebenen Kosten- und Energiedichte-entwicklungen bis 2030 ausgegangen.

Für die gravimetrische Energiedichte sind die gesamte (größere Wh/kg-Angabe) und die nutzbare (kleinere Angabe) Energiedichte angegeben. Gleiches gilt für die Leistungsdichte.

Die kalendarische Lebensdauer ist für alle Elektrofahrzeug-Typen mit 8 bis 10 Jahren angegeben. Wünschenswert wäre eine Verbesserung auf 10 bis 15 Jahre (langfristig, jenseits 2030 evtl. sogar 15 bis 20 Jahre, um an die Nutzungsdauer heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor heranzukommen).

Bzgl. der Zyklenzahl sind die Anforderungen an die zyklische Lebensdauer mit der jeweiligen Entladetiefe verortet: HEV 15 000–20 000 bei 2 bis 8 Prozent, PHEV 4000–5000 bei 80 Prozent, BEV 1000–2000 bei 80 Prozent Entladetiefe. Besonders mit der zunehmenden Anforderung an eine Schnellladefähigkeit der Batterien (>>3 C-Rate) steigen auch die Anforderungen an die Lebensdauer.

Den Umgebungsbedingungen wird mit der Angabe der Leistungsdichte bei niedriger Temperatur von -20°C Rechnung getragen. Sie liegt etwa um den Faktor 5 unter der normalen Leistungsdichte eines Elektrofahrzeug-Typs, HEV mit 200–400 W/kg, PHEV mit 100–300 W/kg und BEV mit 60–120 W/kg.

Für das Sicherheitsranking wird noch ein Testverfahren auf Systemebene benotwendigt, auf Zellebene gilt das EUCAR-Level als ausreichend. Die Angabe des Wertes von „≤4“ für alle Elektrofahrzeug-Typen bedeutet, dass die Batteriezellen kein Feuer oder Flammen entwickeln dürfen, sie dürfen nicht brechen und nicht explodieren. Akzeptabel ist auf diesem Level noch ein Gewichtsverlust bzw. das Auslaufen des Elektrolyten (bzw. Lösungsmittel und Salz) von mehr als 50 Prozent, die sogenannte Entgasung (engl. „venting“).

Die Kostenangaben beziehen sich auf die Batteriekosten auf Systemebene (für BEV liegen Batteriesysteme heute etwa 1,3- bis 1,5-mal über den Kosten der Batteriezellen) und ergeben mit der Batteriegröße (in kWh) im Elektrofahrzeug den abgeschätzten Kostenanteil der Batterie (wie sie OEM vermutlich an den Endkunden weitergeben – dies ist allerdings ein fiktiver Wert, da die Batterie nicht unabhängig vom Elektrofahrzeug gekauft wird). Tatsächlich kaufen OEM in der Regel Batteriezellen ein und erledigen die Modul-/Systemherstellung zunehmend intern. Die Zellkosten sind in den letzten Jahren enorm gesunken (sicherlich

gekoppelt an die aktuell bestehenden Überkapazitäten und noch zu geringe Nachfrage nach Elektrofahrzeugen), und liegen aktuell teilweise deutlich unter 200 €/kWh. Diese Entwicklung wird sich bei einer Massenproduktion durch Skaleneffekte noch fortsetzen, weshalb eine zukünftig potenziell disruptive Technologie mit diesen deutlich reduzierten Kosten konkurrieren müsste.

Noch vor der Energiedichte sind daher die Kosten der absolute und entscheidende Schlüsselparameter, ob es auf absehbare Zeit eine andere Batterietechnologie neben der in Zukunft weiter optimierten großformatigen LIB in einem Elektrofahrzeug geben kann.

Ausgehend von diesen Anforderungen ist, wie in der Gesamt-Roadmap auch anhand von Lernkurven gezeigt, in den kommenden 10 Jahren eine Verdopplung der Energiedichte möglich bzw. zu erwarten. Auf Zellebene großformatiger LIB dürfte gegenüber heute 150–160 Wh/kg eine Verdopplung vermutlich bestenfalls insgesamt in der LIB Entwicklung bis jenseits 2030 erreichbar sein. Betrachtet man aber die Potenziale von der Material-, Komponenten-, Zell- bis Batteriesystementwicklung (auf Systemebene sind heute rund 110–120 Wh/kg erreicht), dann ergeben sich weitere Optimierungspotenziale, so dass Verlustfaktoren auf allen Ebenen reduziert werden können. Die Weiterentwicklung der Energiedichte ist für verbesserte Reichweiten von Elektrofahrzeugen ganz zentral und daher gerade für PHEV und BEV sehr

wichtig (++) und langfristig für BEV der entscheidende Parameter (+++). Die Leistungsdichte ist mittel- und langfristig mehr für PHEV und HEV von Bedeutung. Lebensdauer und Sicherheit sind für Batterien in allen drei Konzepten wesentlich (++).

Für die Kostenentwicklung großformatiger LIB-Zellen könnten 150–200 €/kWh bis 2020 erreicht werden. Auf Systemebene könnten entsprechend 200–250 €/kWh erreichbar sein (gemeint sind hier allerdings vornehmlich Batterieproduktionskosten für BEV und optimistische Grenzwerte, unabhängig von ausgehandelten Verkaufspreisen zwischen Zellherstellern und OEM).

Da zudem zur Erlangung höherer Reichweiten zunehmend Konzepte mit größeren Batterien (im Bereich von 30 bis 70 kWh) Einsatz finden werden, müssen auch jenseits 2020 die Batteriekosten weiter gesenkt werden, um Elektrofahrzeuge bei zusätzlicher Batteriekapazität nicht wieder teurer zu machen. Daher stellen die Kosten langfristig einen entscheidenden Parameter dar (+++).

Anwendungen und Produkte (BEV, PHEV, HEV)

Ausgehend von den heute vorliegenden Leistungsparametern der Elektrofahrzeug-Batterien ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten der Auslegung, wobei nicht nur Konzepte wie BEV, PHEV und HEV gemeint sind, sondern auch die Auslegung der Konzepte für reine batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) selbst.

Entwicklung zentraler Parameter von Batterien und Elektrofahrzeugen

(bezogen auf großformatige LIB, keine Post-LIB)

Großformatige LIB für BEV ^{3,4}	2015	2020	2030	>2030
Energiedichte (Zelle) in Wh/kg	150–160	<200–250	250–300	270–300+
Energiedichte (System) in Wh/kg	110–120	140–180	180–250	200–250+
Kosten (Zelle) in €/kWh	200–400	150–300	<100–200	50–100
Kosten (System/ Pack) in €/kWh	300–600	200–400	<150–300	60–150

Beispiel BEV (Kostenoptimiert)

Batteriegröße in kWh	25	25	25	25
Verbrauch in km/kWh	5–8	8–10	10–12	>12
Reichweite in km	125–200	200–250	250–300	>300
Batteriegewicht in kg (Zelle)	<170	<125	<100	<80–90

Beispiel BEV (Reichweitenoptimiert)

Batteriegröße in kWh	30	40	50	60
Verbrauch in km/kWh	5–8	8–10	10–12	>12
Reichweite in km	150–240	250–400	500–600	>600
Batteriegewicht in kg (Zelle)	<200	<200	<200	<200

ZEIT →		2015			KURZFRISTIG	MITTLERFRISTIG
ANWEND. & PRODUKTE	BEV (LIB) (Kosten- und Reichweiteoptimiert)	15-30 kWh (und mehr), Energiedichte ++, Reichweite (nominal) 150-250 km	~200-250 Tsd. je ~25 kWh, 5-7 GWh 200-300 kg, 5-8 km/kWh, 150-250 km		Technologische Ausdifferenzierung: Optimierung von Kosten oder Reichweiten	
	PHEV (LIB)	5-20 kWh, Energie-/Leistungsdichte ++, Reichweite (nominal) 30-80 km	~200-250 Tsd. je ~10 kWh, 2-3 GWh 100-200 kg, 3-6 km/kWh, 30-80 km		Breiteres Angebot und Technologiereifung	
	HEV (NiMH, LIB)	0,5-1 kWh, Leistungsdichte ++, Reichweite (nominal) ~5-8 km	~1,5 Mio je ~1 kWh, 1-1,5 GWh ~20 kg, 5-8 km/kWh, 5-8 km		Beginn der Sättigungsphase	
	FCEV (H ₂ /PEM 700 bar + LIB)	Hauptleistung durch BZ (100-200 kWh), Spitzenlast 1-2 kWh (Hybridspeicher)	~Hunderte, 100-200 kg-System, 3-7 kg H ₂ , ~4 km/kWh, 400-800 km		Übergang von Demonstrationsprojekten (Busse, PKW etc.) zu Kleinserien	
PRODUKTANFORDERUNGEN		BEV	PHEV	HEV		
	Energiedichte (Wh/kg) (System)	70-110 total	60-80	30-50	Energiedichte (Wh/kg und Wh/l) mit optimierter LIB erhöhen Verlustfaktoren Material → Zelle → System reduzieren	
	Leistungsdichte (W/kg) (System)	300-600	500-1.500	1.000-2.000	Status quo bzw. Verbessern	
	Lebensdauer (kalendarisch und zyklisch)	8-10 Jahre 1.000-2.000	8-10 Jahre 4.000-5.000	8-10 Jahre 15.000-20.000	10-15 Jahre Zykluszahl erhöhen	
	Umgebungsbedingungen (Temperatur)	Tief: -25 °C Hoch: +50 °C	Tief: -25 °C Hoch: +50 °C	Tief: -25 °C Hoch: +50 °C	Status quo bzw. Verbessern	
	Sicherheit (EUCAR-Level)	≤4	≤4	≤4	Status quo bzw. Verbessern	
	Kosten (System, €/kWh)	300-600	400-700	800-1.200	Kosten (BEV/PHEV) bis 2020 senken mind. auf 200-250 €/kWh System, 150-200 €/kWh Zelle	

So können Batteriegröße und damit Reichweite unterschiedlich ausgelegt sein, was jedoch durch den heute noch hohen Kosten- und damit Wertschöpfungsanteil der Batterien zu hohen Fahrzeugpreisen führen kann. Heute sind kostenoptimierte BEV mit 15–30kWh Batteriekapazität und 100 bis 250 Kilometer Reichweite für 15 000 bis 30 000 € (z. T. noch höher) erhältlich. Daneben gibt es aber auch BEV mit 60–100kWh und dadurch hoher Reichweite von 300 bis 500 Kilometer jedoch im hochpreisigen Segment von 50 000 bis 100 000 €.

Für die Zukunft gilt es daher, Elektrofahrzeuge mit hohen Reichweiten und zu Preisen im Bereich heutiger PKW mit Verbrennungsmotor (einer jeweiligen Klasse) anzubieten, wenn sich die Elektromobilität in Breite entfalten soll.

Die Roadmap befasst sich daher im Weiteren mit der Frage, welche Entwicklungsmöglichkeiten sich für Elektrofahrzeuge in den kommenden 10 bis 20 Jahren durch die Entwicklung der Batterietechnologie ergeben. Insbesondere, wie sich Elektromobilität zu einer massenmarktauglichen Elektromobilität hin entwickeln kann. Hierzu fasst die Tabelle (S. 7) die aus der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ gewonnenen Erkenntnisse bzgl. der Entwicklung von Energiedichten und Batteriekosten zusammen. Anhand heutiger typischer BEV mit 25 oder 30kWh Batteriegröße lassen sich damit Batteriegewicht, aber auch die Reichweite der Elektrofahrzeuge über den Verbrauch in km/kWh angeben. Die Werte für den Verbrauch sind im Folgenden über die am Markt verfügbaren Modelle ermittelt und werden aus Vergleichen zu zwei Zeitpunkten (zur Marktein-

2020			LANGFRISTIG	2030		
~0,5-1,5 Mio je ~25-40 kWh, 20-60 GWh 100-200 kg, 8-10 km/kWh, 250-400 km			Technologiereifung und Diffusionsbeginn	~5-10 Mio je ~25-60 kWh, 0,1-1 TWh 80-200 kg, 12-14 km/kWh, 300-700 km		
~0,5-1,5 Mio je ~10 kWh, 5-15 GWh ~100 kg, 4-7 km/kWh, 50-100 km			Diffusion und Beginn der Sättigung	~1-5 Mio je ~10 kWh, <100 GWh 50-80 kg, 5-8 km/kWh, >100 km		
~1 Mio je ~1 kWh, ~1 GWh (NiMH und LIB)			Sättigung bzw. Rückgang der Nachfrage	<1 Mio je ~1 kWh, < GWh (LIB dominiert)		
~Tsd. bis 100 Tsd. (Bestand) Herausforderung H ₂ - und Tankinfrastruktur (Kosten)			Entscheidung, ob Komplementär oder Konkurrenztechnologie zu BEV ("grüne" Wasserstoffwirtschaft?)	Koexistenz (Langstrecke) oder Einsatz jenseits PKW?		
BEV	PHEV	HEV		BEV	PHEV	HEV
++	++	0	Faktor >2 gegenüber 2015	+++	++	+
+	++	++	Status quo bzw. Verbessern	+	++	++
++ ++	++ ++	++ ++	10-15 Jahre Zykluszahl erhöhen	++ ++	++ ++	++ ++
+	+	0	Status quo bzw. Verbessern	+	+	0
++	++	++	Status quo bzw. Verbessern	++	++	++
++	++	+	Kosten halbieren von 2020 bis 2030	+++	+++	+

Bedeutung der Parameter und Änderung 2020-2030
0 neutral + wichtig
++ sehr wichtig +++ entscheidend

Neuzul./Jahr* (xEV), Batteriekapazität (kWh),
 Batteriemarkt/Welt (GWh),
 Batteriegewicht (kg), Verbrauch (km/kWh),
 Reichweite (km)

Aktueller Stand bzw.
 Stand der Technik

*) Für Deutschland geschätzt: ~ 5 % der weltweiten Neuzulassungen

führung vor 2015 sowie in 2015) fortgeschrieben. Diese Werte sind zugleich mit den in der japanischen NEDO-Roadmap angegebenen Werten in Einklang. Die ermittelten Parameter liefern die Ausgangsbasis für weitere Berechnungen in dieser vorliegenden Roadmap.

Ein Fokus liegt dabei auf der Entwicklung von BEV, für welche neben einem kostenoptimierten Szenario (siehe Tabelle und Roadmap), in welchem die Batteriekapazität beibehalten wird und sich eine Kostenreduktion durch die Batterie direkt auf den Fahrzeugpreis auswirkt, auch ein reichweitenoptimiertes Szenario betrachtet wird, in welchem die Kostenreduktion der Batterie zugunsten einer Erhöhung der Batteriegröße umgelegt wird. Das reichweitenoptimierte Szenario beschreibt damit einen Pfad

der sukzessiven Reichweiten-Erhöhung entlang einer preislich für eine breitere Bevölkerung erschwinglichen Elektromobilität. Demgegenüber steht der Ansatz (z. B. von Tesla Motors Inc.), von einer hohen Reichweite zu hohen BEV-Kosten auszugehen und den Preis sukzessive auf ein Niveau für den breiten Massenmarkt zu drücken.

PHEV werden nur bedingt betrachtet, wo Vergleiche und eine Einsortierung möglich sind. HEV werden weitestgehend außer Acht gelassen, da diese gerade für Deutschland bzw. Europa nicht zentral sind. In Ergänzung wird aber auch hier vergleichend kurz auf FCEV und potenzielle Marktentwicklungen eingegangen.

STATUS QUO UND ENTWICKLUNG VON BRENNSTOFFZELLEN-FAHRZEUGEN

Die PEM-Brennstoffzelle mit 700 bar-Tank (Wasserstoffspeicher) und typischerweise rund 140 kWh Systemgröße ist die Referenztechnologie für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV). Sie setzt eine Brennstoffzelle als energieerzeugendes Aggregat ein und zu ihrer Unterstützung sowie der Bereitstellung der Spitzenlast einen Hybridspeicher (LIB). Sie stellt aus heutiger Sicht durch das Erreichen hoher Reichweiten eine Komplementärtechnologie zu LIB-basierten Elektrofahrzeugen mit in der Regel geringer Reichweite dar. Wesentliche Kernparameter von FCEV sind:

- Energiedichte H_2 : 33 kWh/kg⁵,
- Gewicht H_2 in FCEV (Drucktank): 3–7 kg,
- Energiebereitstellung in FCEV: 100–200 kWh,
- Energiedichte PEM-FC- H_2 -System: 1100 Wh/kg⁶,
- Systemgewicht in FCEV: <100–200 kg,
- Verbrauch rd. 3–4 km/kWh (~100–130 km/kg)⁷,
- Reichweite: 300–600 km (künftig 400–900 km)⁸,
- Preis (H_2): 9–10 €/kg (7–10 €/100 km, heute)⁹.

Die Kosten für das Tanken liegen damit im Bereich herkömmlicher Automobile mit Verbrennungsmotor (siehe Preisentwicklung unter Rahmenbedingungen), jedoch über den Kosten für das Aufladen von Elektrofahrzeugen (diese liegen unter 6 €/100 km bei heutigen Strompreisen von 0,3 €/kWh). Auch der Herstellerpreis eines FCEV (z. B. Hyundai ix35 Fuel Cell, Toyota Mirai) liegt mit heute ca. 78 000 € deutlich über den Preisen von Elektrofahrzeugen (durch hohe Subventionen in einzelnen Ländern/Regionen, z. B. in Südkorea, soll hier ein schnellerer Markteintritt erreicht werden). Für einen direkten Vergleich wäre hier allerdings gerade das Model S von Tesla Motors Inc. angebracht, welches bei einer Auslegung der Reichweite auf 500 bis 600 Kilometer (damit >90 kWh) sogar noch über dem Preis von FCEV liegen würde.

Bei einer Fahrleistung von 20 000 Kilometern pro Jahr würde ein FCEV mit 500 Kilometer Reichweite und rund 140 kWh Systemgröße demnach 5–7 MWh Energie jährlich benötigen. Aufgrund der Verluste (Wirkungsgrad) bei der Wasserstoffherstellung wäre auf 7–10 MWh (Strom, Elektrolysepfad bei 100 Prozent EE) umzurechnen. Im Vergleich hierzu wären für ein BEV

gleicher Fahrleistung (5–8 km/kWh Verbrauch) rund 3–4 MWh pro Jahr notwendig (bis 2030 unter 2 MWh). Für beide Technologien gibt es Verbesserungspotenziale.

Jedoch sind die tatsächlichen Entwicklungs- und Einsatzpotenziale beider technologischer Ansätze weiter zu beobachten und zu bewerten. Der Vergleich über den Fahrzeugverbrauch (in km/kWh) scheint hierbei aber eine gute standardisierte Größe zu sein, da sich die Bewertung somit auch mit einem nationalen/globalen Energiebedarf und der Energieerzeugung in Kontext setzen lässt.

Herausforderungen und Märkte

Neben einigen hundert Pilot- und Demonstrationsfahrzeugen (in Europa, Japan, Korea, USA)¹⁰ stehen der Verbreitung von FCEV jedoch noch größere Herausforderungen im Weg. Hierzu zählen unter anderem die hohen Herstellungskosten für die Brennstoffzellen(-systeme) (die Platinreduktion ist daher z. B. weiterhin FuE-Gegenstand) und schließlich Kosten der FCEV, geringe Wirkungsgrade in der Wasserstoffherstellung (z. B. PEM-Elektrolyse heute bei 65 bis 67 Prozent und bis 2050 ggf. bis 80 Prozent)¹¹ sowie Rückverstromung (z. B. bis 60 Prozent durch PEM-FC)¹², Optimierungspotenziale bzgl. der Brennstoffzellen-Lebensdauer sowie die noch fehlende „grüne“ Wasserstoffinfrastruktur (gekoppelt an den Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE)) und auch die kostenintensive Wasserstofftankstelleninfrastruktur in der Aufbauphase. Damit liegen Herausforderungen in allen Bereichen von der Wasserstoffherstellung (z. B. Elektrolyse), Wasserstoffspeicherung (neben z. B. Druckgasbehältern könnten zukünftig auch H_2 -speichernde organische Materialien weiter entwickelt sein) sowie der Rückverstromung vor.

Kosten können (ebenso wie für LIB) durch Skaleneffekte und hohe verkaufte Stückzahlen (FCEV) reduziert werden, jedoch bleibt die Entwicklung einer Wasserstoff/Brennstoffzellen-basierenden Mobilität kontrovers diskutiert und ist ganz klar im Kontext der Entwicklungspotenziale der batteriegebundenen Elektromobilität und dem Ausbau der EE neben den anderen genannten Herausforderungen zu bewerten. Es wird erwartet, dass sich die Preise von FCEV zwischen 2020 und 2030 zunehmend an die

Preise konventioneller Fahrzeuge angleichen werden.¹³ Damit wären neben der Reichweite auch hinsichtlich der Kostenentwicklung FCEV vergleichbar mit dem BEV-Konzept von Tesla Motors Inc. und den Zielen für die Fahrzeugkostenreduktion.

Insgesamt werden bis 2020 jedoch bestenfalls FCEV in Kleinserien (ggf. einige Tausend bis max. 100 Tausend im weltweiten Bestand) erwartet. Dokumentierte (eher politisch motivierte, z. B. Bestrebungen der Regierungen in Japan und Südkorea FCEV in den kommenden 15 Jahren zu verbreiten) Planungen¹⁴ stellen insgesamt rund 0,5 Millionen FCEV bis 2020 (Bestand) in Aussicht.

Brennstoffzellenfahrzeuge

Tatsächlich sind heute mit dem Hyundai ix35 Fuel Cell (Einführung 2012) und dem Toyota Mirai (Einführung 2014) lediglich zwei in Serie gefertigte FCEV am Markt. Nach ersten Verkäufen vor 2015 wurden zu Beginn 2015 direkt über 1500 Bestellungen für den Toyota Mirai aufgegeben (zu 60 Prozent von der japanischen Regierung und privaten Flottenbetreibern, zu 40 Prozent von Privatnutzern).¹⁵ Die Produktionspläne für den Toyota Mirai sehen 700 in 2015, 2000 in 2016, 3000 in 2017 bis hin zu 30000 in 2020 vor. Diese beiden Modelle dürften daher im Wesentlichen den bis 2020 erwarteten Bestand ausmachen. Und auch bis 2025 werden nicht mehr als 0,5 Prozent der Neuzulassungen durch FCEV erwartet (also im besten Fall einige hunderttausend FCEV).¹⁶

Infrastruktur

Der Erfolg von FCEV setzt letztendlich auch eine Wasserstoffwirtschaft voraus, die mit hohen Investitionen verbunden ist. So beziffern sich allein die Investitionen in eine Wasserstofftankstelle in der Aufbauphase auf ein Vielfaches einer vergleichbaren Ladestation für Elektrofahrzeuge. Diese Investitionen setzen aufgrund

von Netzwerkeffekten jedoch auch eine Unterstützung der Politik voraus. Diese muss zudem unter der Ungewissheit geleistet werden, ob sich Brennstoffzellenfahrzeuge überhaupt gegenüber xEV durchsetzen können und die bestehenden Vorteile von FCEV die weitaus höheren Investitionen rechtfertigen. Die Kosten für eine Wasserstoffinfrastruktur sind zudem stark von der Bevölkerungsdichte eines Landes abhängig, was z. B. Japan in eine bessere Position setzt. Die Kosten für eine Etablierung in den USA fallen im Vergleich bereits doppelt so hoch aus, wenn die Daten über die Einwohnerzahl eines Landes normiert werden und schränken die Erfolgsaussichten somit noch weiter ein.¹⁷

Für eine Wasserstofftankstelle dürften die Kosten in der Dimension von rund 1 Million Euro liegen, wobei in Deutschland sicherlich einige Tausend Tankstellen für eine flächendeckende Infrastruktur benötigt würden (zum Vergleich: Heute gibt es insgesamt etwa 15000 Tankstellen in Deutschland¹⁸). In 2013 wurde z. B. noch das Ziel von 400 Tankstellen und 350 Millionen Euro Infrastrukturkosten bis 2023 ausgegeben.¹⁹ Das Gemeinschaftsunternehmen H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. stellte dem BMVI in 2015 die Pläne zum Aufbau der 400 Wasserstofftankstellen vor. Noch während der Laufzeit des Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellen (NIP) bis 2016 werden 50 Tankstellen gebaut, um die Markteinführung der ersten Brennstoffzellenfahrzeuge zu flankieren. Das BMVI wird die weitere Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie bis 2018 mit 161 Millionen Euro fördern.

Somit könnten Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge in Zukunft tatsächlich sehr ähnliche technische (z. B. Reichweite) und Kostenparameter aufweisen, und sich zunehmend zu Konkurrenztechnologien entwickeln. Daher wird sich zwischen 2020 und 2030 ggf. auch die Frage stellen, ob sich tatsächlich zwei Konzepte und Infrastrukturen parallel durchsetzen und koexistieren können.



STATUS QUO DER ELEKTROMOBILITÄT

Um die Entwicklung von Batterietechnologien, Elektrofahrzeug-technologien und -konzepten sowie die gegenseitig gekoppelte Entwicklung des Marktes für Elektrofahrzeuge zu analysieren, hilft die genaue Betrachtung des Status Quo. Hierdurch können Entwicklungstrends der letzten Jahre abgeleitet werden.

Elektromobilität weltweit

Im Herbst 2015 wurde die Marke von 1 Million Elektrofahrzeugen an weltweitem Bestand erreicht und mit Ende 2015 dürfte der Bestand bei rund 1,2 Millionen BEV und PHEV liegen.

Während HEV sich in den letzten zehn Jahren von einem globalen Markt mit rund 160 000 Neuzulassungen in 2004 zu einem Markt von 1,6 Millionen in 2014 entwickelt haben, weisen die Neuzulassungen bereits seit 2012 auf eine Stagnation des Marktes hin. HEV sind sicherlich als Übergangstechnologie bzw. -konzept zu betrachten und spielen in Deutschland eine untergeordnete Rolle. Die Neuzulassungen von HEV liegen in Deutschland auf dem Level von etwa 20 000 pro Jahr (bislang wurden HEV und PHEV nicht getrennt ausgewiesen). Für HEV ergibt sich bis Ende 2015 damit ein Bestand von 10 Millionen Fahrzeugen weltweit.

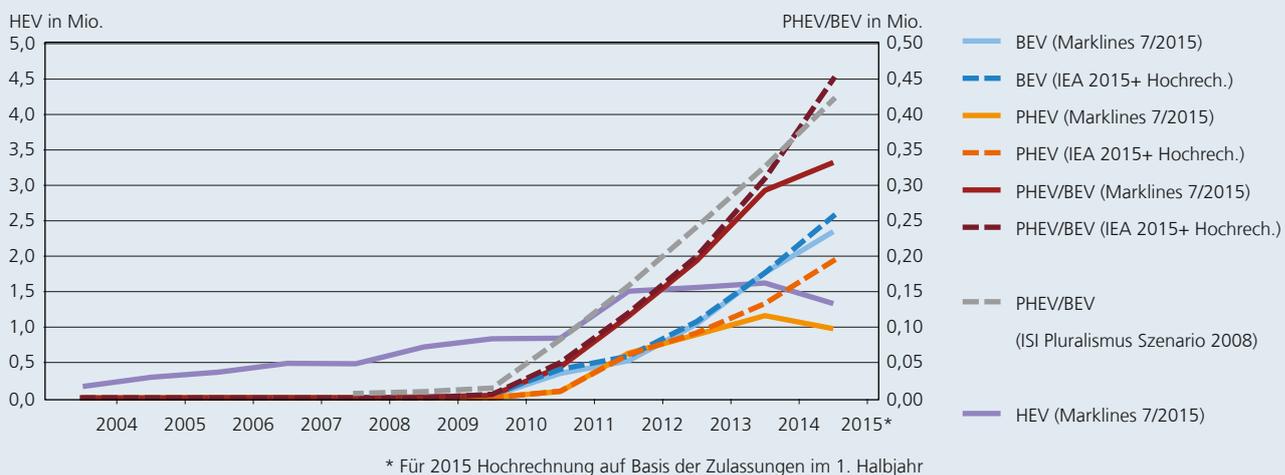
Für die Zukunft ist mit einer Sättigung der HEV Verkaufszahlen und langfristig einem Rückgang zu rechnen. Aus Sicht der Batterietechnologie dürfte ein zunehmender Einsatz von LIB gegenüber den heute dominierenden Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Batterien mit der Sättigungsphase derart zusammen fallen, dass sich für die im Durchschnitt rund 1 kWh großen Batterien ein jährlicher Markt von etwa 1 GWh ergibt, welcher langfristig verschwindet.

Für PHEV und BEV stiegen seit der Markteinführung erster in Serie gefertigter Fahrzeugmodelle in 2009/2010 die Verkaufszahlen von rund 5000 in 2010 auf 50 000 in 2011 bis auf hochgerechnet 450 000 (ggf. sogar 0,5 Millionen) in 2015. PHEV und BEV hatten dabei in den letzten Jahren prinzipiell ähnliche Verkaufszahlen, obgleich bereits heute die Verkäufe von BEV zu überwiegen scheinen. Hier kann es regional aber (ebenso wie für HEV) starke Schwankungen geben.

Für PHEV und BEV zusammen ergibt sich bis Ende 2015 ein Bestand von über 1 bis 1,2 Millionen Fahrzeugen. Dabei folgt die Entwicklung der Elektromobilität bis heute dem vom Fraunhofer ISI 2008 entwickelten sog. Pluralismus Szenario²⁰ als pessimistischem Szenario für die Entwicklung der Elektromobilität.

Weltweite Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen

(links für HEV in Mio. und rechts für PHEV/BEV in Mio.)²¹



Elektromobilität in Europa

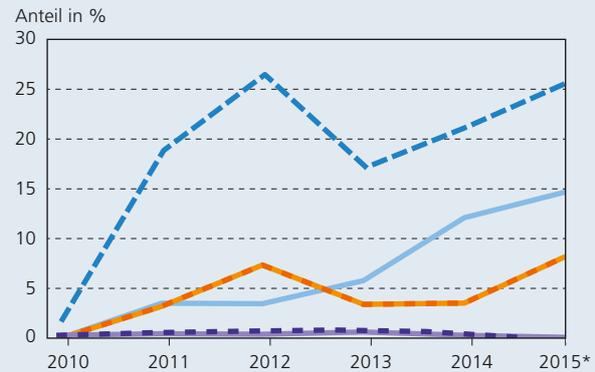
Mit Blick auf Europa sollte der europäische (EU-)Absatzmarkt einerseits, aber auch der Marktanteil europäischer OEM im globalen Wettbewerb andererseits unterschieden werden.

Aus der Perspektive der deutschen und europäischen OEM zeigen die Anteile an den weltweit verkauften Elektroautos einen mittlerweile wachsenden Anteil im Bereich der BEV. Während der Weltanteil an den Verkaufszahlen von europäischen OEM bei 20 bis 25 Prozent liegt, haben alleine die deutschen OEM in 2014/2015 einen Anteil von 10 bis 15 Prozent erreicht. Bei PHEV ist der deutsche Anteil sogar gleich dem europäischen Anteil, welcher im Durchschnitt über 5 Prozent, aber unter 10 Prozent liegt. Durch die Verbreiterung des Fahrzeugangebots (siehe Rahmenbedingungen auf Seite 31 wäre allerdings zu erwarten, dass sich dieser Anteil in den kommenden Jahren noch erhöht oder zumindest stabilisiert.

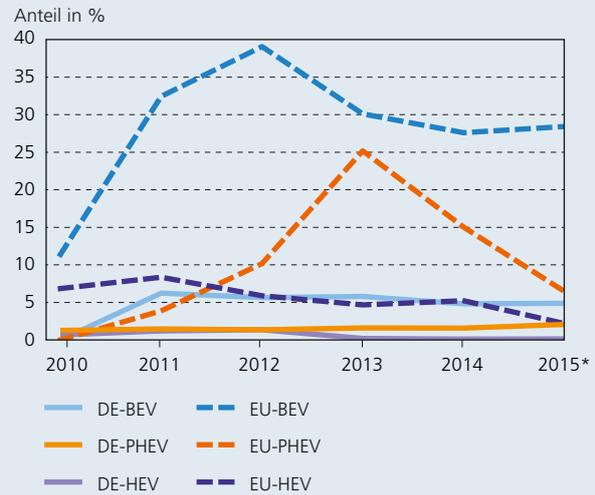
Sowohl für deutsche als auch europäische OEM insgesamt ist der Anteil an den weltweit verkauften HEV dabei jedoch verschwindend bzw. nicht existent.

Dies zeigt sich auch, wenn man den Anteil der in Deutschland und Europa verkauften HEV betrachtet: Da für Deutschland durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) BEV und PHEV erst jüngst getrennt ausgewiesen werden, ergibt sich hier ein Mittelwert zwischen den verschwindenden Anteilen der HEV-Verkäufe (rund 20000 HEV in Deutschland von 1,5 Millionen weltweit verkauften, also rund 1,3 Prozent) und einem Anteil für PHEV, welcher eher bei rund 5 Prozent wie der Anteil der Verkäufe von BEV liegen dürfte.

Anteil deutscher und europäischer OEM an BEV/PHEV Verkäufen

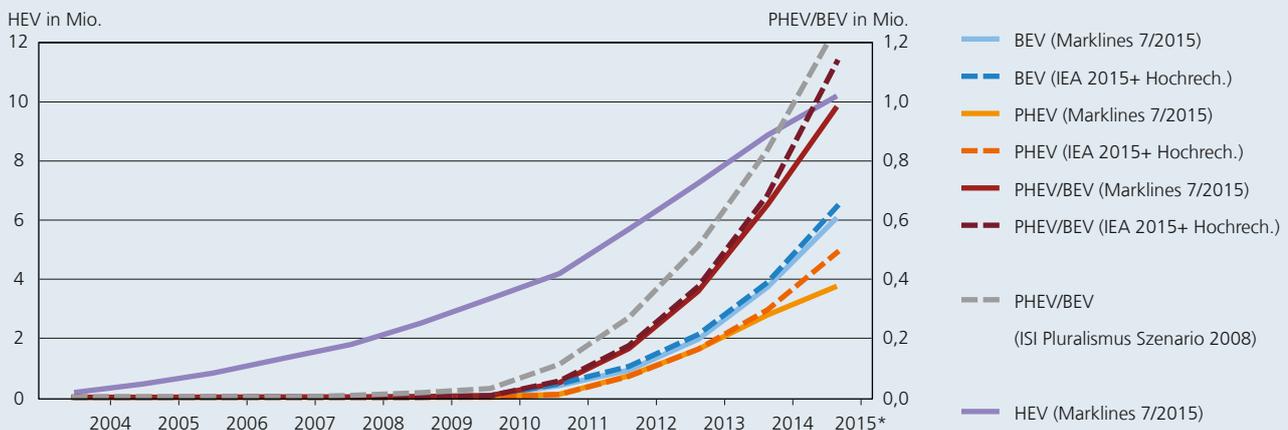


Anteil des deutschen und europäischen Marktes für BEV/PHEV



Weltweiter Bestand von Elektrofahrzeugen

(links für HEV in Mio. und rechts für PHEV/BEV in Mio.)



* Für 2015 Hochrechnung auf Basis der Zulassungen im 1. Halbjahr

Da sich sowohl weltweit als auch im deutschen Markt die Verkaufszahlen der PHEV und BEV in etwa ähnlich entwickeln, lässt sich somit auch für PHEV und BEV gemeinsam von einem in den letzten Jahren etwa gleichbleibenden deutschen Markt von 5 Prozent an den globalen Verkäufen sprechen. Bei 3 Millionen deutschen PKW-Neuzulassungen in 2014 und einem Bestand von 44,4 Millionen PKW in Anfang 2015 im Vergleich zu 65 Millionen weltweiten PKW-Neuzulassungen und 930 Millionen PKW im Bestand (d. h. Deutschland hat insgesamt 5 Prozent Anteil an den globalen PKW-Zulassungen) ergibt sich ein im Vergleich genau durchschnittlicher Verkauf.

Mit Blick auf den europäischen Markt ergibt sich bei den BEV-Verkäufen mittlerweile ein Anteil von rund 30 Prozent, für PHEV zwischen 2 bis 25 Prozent (hier müssen sich Verkaufszahlen vermutlich noch besser einpendeln). Gemeinsam ergibt sich für BEV und PHEV damit aber eine europäische Nachfrage von 20 bis 30 Prozent.

Elektromobilität in Deutschland²²

Die absoluten Neuzulassungen in Deutschland haben sich bis 2015 auf das Niveau von über 40 000 Elektrofahrzeugen (inkl. HEV) entwickelt. Nach Hochrechnungen noch in 2015 dürften Neuzulassungen von BEV und PHEV gemeinsam bei bis zu 25 000 für 2015 liegen. Kumuliert ergeben sich bis 2015 rund 200 000 Elektrofahrzeuge (darunter über 50 000 BEV und PHEV), welche heute auf deutschen Straßen fahren.

Eine Fortschreibung dieser Entwicklung könnte bis 2030 zu 0,2 bis 0,5 Millionen Elektrofahrzeug-Neuzulassungen (HEV dürften bis dahin kaum noch eine Rolle spielen) und 1,5 bis 3 Millionen Elektrofahrzeuge im Bestand führen (siehe Abbildungen unten).

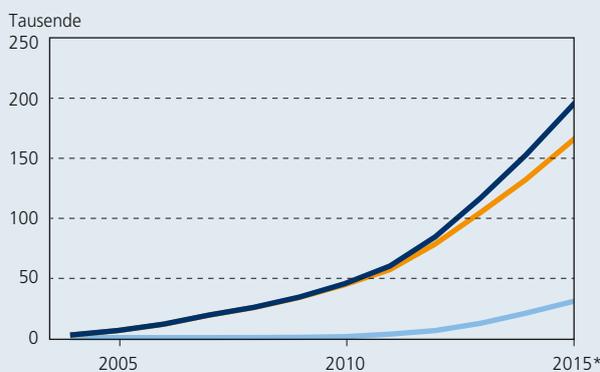
Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen in Deutschland



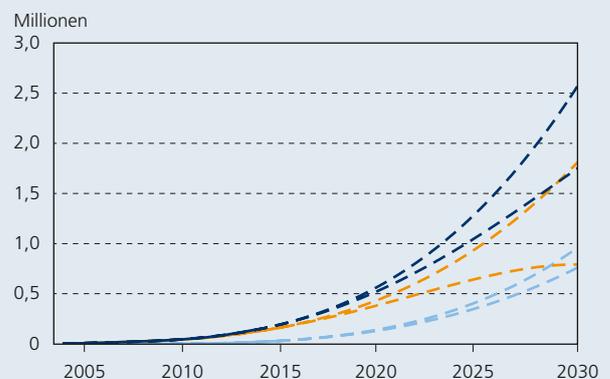
Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen in Deutschland (Fortschreibung)



Bestand von Elektrofahrzeugen in Deutschland



Bestandsentwicklung der Elektrofahrzeuge in Deutschland (Fortschreibung)



— Elektrofahrzeuge (gesamt)
— PHEV/HEV DE (Statista/KBA)
— BEV DE (Statista/KBA)

- - - Elektrofahrzeuge (gesamt, Szenario)
- - - PHEV/HEV DE (Szenario)
- - - BEV DE (Szenario)

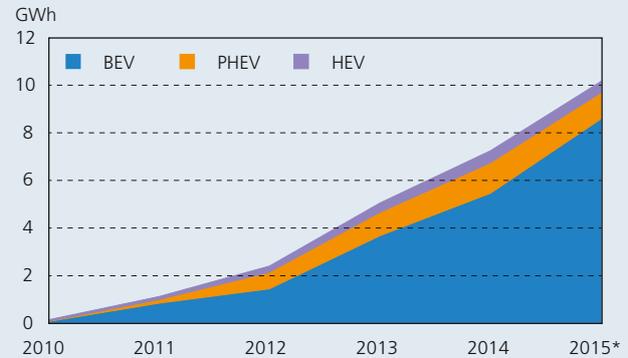
LIB-Zellbedarf für Elektrofahrzeuge (global)

Die Verkaufszahlen der jeweiligen Fahrzeugmodelle zusammen mit den in jedem Elektrofahrzeug eingesetzten Batterietyp entsprechender Kapazität (kWh) ergeben zusammen die Entwicklung der Zellnachfrage für xEV (BEV, PHEV und HEV). Bis 2015 hat sich der LIB-Zellbedarf gegenüber nahe 0 GWh in 2010 auf über 10 GWh weltweit entwickelt. Von BEV ergibt sich dabei alleine durch die Batteriekapazität ein hoher Bedarf, aus Sicht des LIB-Marktes sind BEV mit Abstand als attraktivster Zukunftsmarkt einzustufen. PHEV stellen einen weiteren großen, jedoch aus Sicht des LIB-Marktes bereits weniger attraktiven Markt dar. Für HEV sind nur die Anteile verkaufter LIB-Zellen angegeben (rund 80 bis 90 Prozent der HEV fahren heute aber noch mit NiMH Batterien). Der kumulierte LIB-Zellbedarf zeigt dabei, dass bislang 1,8 GWh LIB-Zellen für HEV eingesetzt wurden (bei durchschnittlich 1 kWh Batteriekapazität und 10 Millionen HEV-Bestand entspricht dies 18 Prozent eines kumulierten 10 GWh-Marktes für HEV-Batterien). Auch die kumulierten Daten zeigen die hohe Nachfrage besonders nach LIB-Zellen für BEV: 20 GWh von über 26 GWh LIB-Nachfrage. Rechnet man NiMH-Batterien mit ein, so liegt der kumulierte Markt bei rund 35 GWh bis 2015.

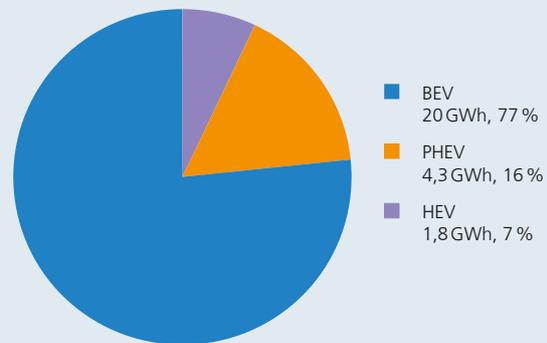
Aus Sicht der in den LIB-Zellen eingesetzten Zellchemien zeigt sich eine aktuell dominierende Nachfrage nach auf NCA(-Kathoden) basierten Zellen. Dies ist besonders auf die von Tesla Motors Inc. im Model S eingesetzten kleinformatigen (jedoch auf 60 bis 90 kWh ausgelegten) LIB-Zellen von Panasonic Corp. zurückzuführen. Aber auch im Nissan Leaf werden LMO/NCA (blend)-basierte Zellen verwendet.²³ Die Nachfrage nach LFP hingegen ist zu einem überwiegenden Teil auf den chinesischen Markt zu beziehen. Chinesische Zellhersteller beliefern hier chinesische OEM (und nur BYD Co. Ltd. deckt beides ab), welche einen chinesischen Markt von Elektrofahrzeugkäufern bedienen. Jedoch fällt hier z. B. auch der Mitsubishi Outlander als PHEV mit LFP-Batterie darunter. Die Nachfrage nach NMC-basierten LIB-Zellen hängt stark mit den von europäischen, aber auch US-amerikanischen und japanischen OEM bevorzugten Zellchemien zusammen. Mit wachsenden Verkaufszahlen der Elektrofahrzeuge dieser OEM, aber auch durch die zu beobachtenden Konsolidierung hin zu Hochenergie-NMC ist hier möglicherweise mit einem großen Wachstumsmarkt (gegenüber NCA und LFP) zu rechnen. In den letzten Jahren haben sich die OEM weltweit somit noch für unterschiedliche Zellchemien und dabei auch unterschiedliche Kooperationen bzw. Lieferverträge mit Zellherstellern entschieden. Bezüglich der Verteilung von Zellchemien zeigt sich, dass aktuell rund 70 Prozent NMC und NCA gegenüber 30 Prozent LFP nachgefragt werden. Wie sich dieses Verhältnis zukünftig entwickeln wird, hängt nun stark von der Entwicklung der Technologien sowie der Entscheidung der OEM für eine jeweilige Technologie und der Nachfrage nach Elektrofahrzeugmodellen ab.

Entwicklung LIB-Zellbedarf für xEV bis 2015 ...

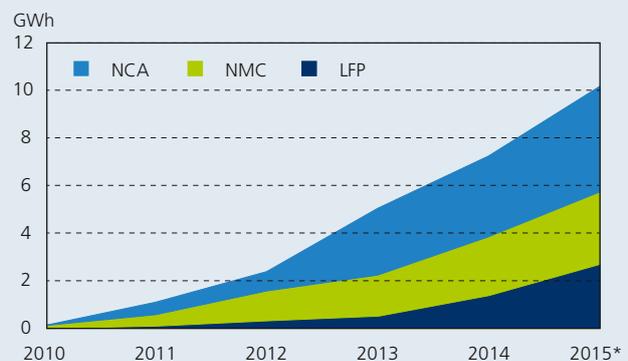
nach Konzepten (GWh)



kumuliert (inkl. Hochrechnung 2015)



nach Zellchemien (GWh)



nach Zellchemien (Anteile)



Welche Zellhersteller und OEM bislang am meisten voneinander profiziert haben, zeigen die Tabellen anhand der bis 2015 weltweit 20 erfolgreichsten Anbieter bzw. OEM von Elektrofahrzeugen, welche über 95 Prozent der mehr als 1 Million BEV und PHEV und damit 25 GWh LIB-Zellen verkauft haben.

Unter den OEM hat die Nissan Motor Company, Ltd. mit rund 20 Prozent z. B. die meisten Elektrofahrzeuge (z. B. Nissan Leaf) verkauft, es folgen General Motors Company, Tesla Motors Inc. und Mitsubishi Motors Company (insbesondere der Mitsubishi Plug-In Hybrid Outlander). Jedoch wurden mit dem Model S von Tesla Motors Inc. etwa 30 Prozent des bisherigen Umsatzes an LIB-Zellen (in GWh) erzielt (zur Umrechnung sind Zellpreise in der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ zu finden).

Aus Sicht der Zellhersteller hat ebenfalls Panasonic Corp. mit dem Verkauf der 18650 NCA-Zellen rund. 30 Prozent des Umsatzes gemacht. Das Joint Venture AESC (Automotive Energy Supply Corporation, gegründet von Nissan Motor Company, NEC Corp. und NEC Energy Devices) hat 20 Prozent Anteil. LG Chem Ltd. profitiert mit 12 Prozent Marktanteil durch ein heute bereits breites Netzwerk mit mehreren Kunden. Dieses wird fortlaufend

ausgebaut. Samsung SDI kommt trotz mehrerer Abnehmer nur durch den Erfolg des BMW i3 und i8 auf einen Anteil von über 5 Prozent. Beachtlich ist der hohe (und erst in 2014/2015 hinzugekommene) Anteil durch chinesische Zellhersteller mit ebenfalls von chinesischen OEM hergestellten Elektrofahrzeugen für den Binnenmarkt.

Die Erwartung, dass ggf. Panasonic Corp., LG Chem Ltd. und Samsung SDI die dominierenden Zellhersteller für Elektrofahrzeugbatterien sind, kann somit (bei bislang zusammen rund 50 Prozent Marktanteil) zumindest bis 2015 nicht bestätigt werden. Allerdings haben erste Konsolidierungsprozesse stattgefunden und mit der Bindung (zumindest in naher Zukunft) zwischen OEM und Zellherstellern sind die Weichen für diese drei asiatischen Hersteller sicherlich gestellt. Denn NEC Corp. mit Nissan Motor Company und GS Yuasa Corp. mit Mitsubishi Motors Company ebenso wie BYD Co. Ltd. sind als weitere erst zu nehmende Konkurrenten unter den Zellherstellern jeweils (heute noch) praktisch singulär an einzelne OEM gebunden und von dem Erfolg deren Elektrofahrzeugen abhängig. Damit haben sich vermutlich für die nahe oder auch fernere Zukunft die zentralen Zellhersteller für Elektrofahrzeuge am Weltmarkt positioniert.

Verkaufte BEV/PHEV (in Tsd.) der OEM vs. LIB-Zellen der Hersteller (in GWh)²⁵

OEM	Sales* (Tsd.)	Panasonic	Sanyo	LG Chem	Samsung SDI	AESC (NEC)	LEJ (GS Yuasa)	BYD	other China	other	GWh**
Renault	37			0,82							0,82
Nissan	199					4,78					4,78
Tesla	96	7,20									7,20
Chery	46								1,03		1,03
BMW	48				1,00						1,00
Mitsubishi	82						1,08				1,08
BAIC	27								0,61		0,61
Zotye	42								0,74		0,74
BYD	67							1,56			1,56
Audi	<1		<0,01								<0,01
Daimler	7						<0,01			0,12	0,13
Ford	61		0,41	0,14							0,55
Porsche	3	0,02			0,02						0,04
Fiat	10				0,23						0,23
GM	116			1,80						0,19	1,99
SAIC	4								0,05		0,05
Geely	39			0,13					0,42		0,55
JAC	23								0,44		0,44
Toyota	77		0,35								0,35
VW	1		0,01								0,01
Rest***	35									1,08	1,08
Total****	1020	7,22	0,78	2,89	1,25	4,78	1,09	1,56	3,29	1,39	24,25

*, **, ***, **** Erläuterungen in Referenz 25

TOP 40 BEV- und PHEV-Modelle, welche bis 2015 mindestens 95 Prozent der weltweiten Elektrofahrzeugverkäufe ausmachen (inkl. Charakteristika zur Markteinführung und in 2015)^{26, 27}

Land	OEM	BEV	kWh	Reichweite in km bei Markteinf.	Reichweite in km aktuell in 2015	Basispreis in € bei Markteinf.	Basispreis in € aktuell in 2015	Zellhersteller	Zellchemie
DE	BMW	BMW i3	18,8	190	190	34.950	34.950	Samsung SDI	NMC
DE	Daimler	Fortwo	17,6	145	145	18.910	18.910	Li-Tec	NMC
FR	Renault	Renault ZOE	22	210	240	21.700	21.500	LG Chem	NMC
IT	Fiat	Fiat 500e	24	128	128	28.415	28.415	Samsung SDI	NMC
JP	Nissan	Nissan Leaf	24	175	199	36.990	23.060	AESC (Nissan & NEC)	NCA
JP	Mitsubishi	iMIEV	16	150	160	34.390	23.790	LEJ (GS Yuasa & Mitsubishi)	NMC
JP	Mitsubishi	Minicab-MiEV	10,5	100	100	17.642	17.642	LEJ (GS Yuasa & Mitsubishi)	NMC
US	Tesla	Tesla Model S	60/70	375	420	71.400	83.500	Panasonic	NCA
US	Ford	Ford Focus	23	122	162	34.900	34.900	LG Chem	NMC
US	GM	Chevrolet Spark	20	132	132	23.228	23.228	A123	LFP
CN	Chery	Chery QQ3, Chery eQ	22,3	200	200	22.422	22.422	andere China	LFP
CN	BAIC	BAIC E150	23	150	150	35.029	35.029	Beijing Bride Power	LFP
CN	Zotye	Zotye E20	15	120	120	15.099	15.099	andere China	NMC
CN	BYD	BYD e6	60	200	300	51.856	46.377	BYD	LFP
CN	Zotye	Zotye Cloud 100	17,76	150	150	22.448	22.448	andere China	NMC
CN	Geely	Geely-Kandi Panda, Kandi EV	15	80	80	12.655	12.655	andere China	LFP
CN	JAC	JAC iEV	19	130	160	22.216	23.876	andere China	LFP

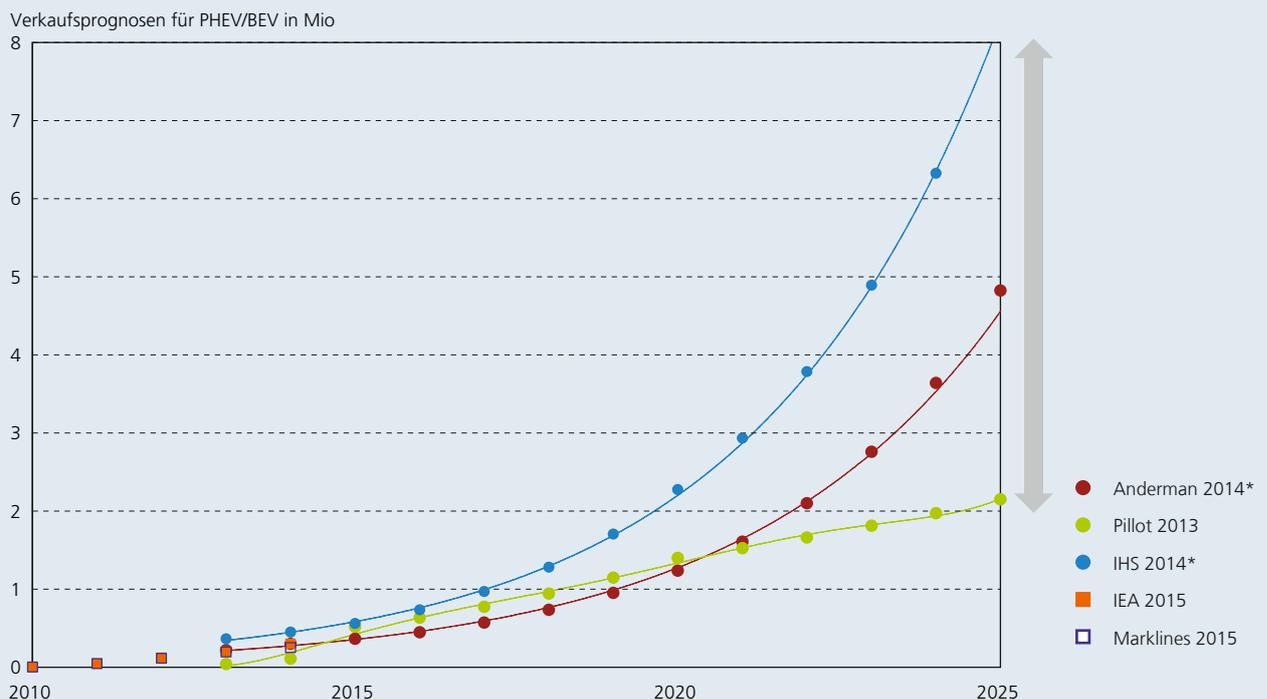
Land	OEM	PHEV	kWh	Reichweite in km bei Markteinf.	Reichweite in km aktuell in 2015	Basispreis in € bei Markteinf.	Basispreis in € aktuell in 2015	Zellhersteller	Zellchemie
DE	VW/Porsche	Porsche Panamera	9,4	36	36	106.720	106.720	Samsung SDI	NMC
DE	VW/Porsche	Porsche Cayenne	10,8	36	36	82.920	82.920	Panasonic	NMC
DE	BMW	BMW i8	7	37	37	126.000	126.000	Samsung SDI	NMC
DE	VW/Audi	Audi A3	7,5	50	50	37.900	37.900	Sanyo	NMC
DE	VW	VW Golf	8,7	50	50	36.900	36.900	Sanyo	NMC
DE	VW/Porsche	Porsche 918	7	25	25	744.461	744.461	k. A.	LIB
DE	Daimler	Daimler S-Klasse	8,7	33	33	109.778	109.778	LEJ (GS Yuasa & Mitsubishi)	LFP
DE	VW	VW XL1	5,5	50	50	111.000	111.000	k. A.	LIB
JP	Toyota	Toyota Prius	4,4	25	25	36.200	36.600	Sanyo	NMC
JP	Mitsubishi	Outlander	12	52	52	41.990	39.990	LEJ (GS Yuasa & Mitsubishi)	LFP
JP	Honda	Accord	6,7	24	24	35.486	36.190	Blue Energy (GS Yuasa & Honda)	NMC
UK	McLaren	McLaren P1	11	11	11	1.030.000	1.030.000	k. A.	LIB
US	GM	Chevrolet Volt	17,1	60	60	36.636	30.533	LG Chem	NMC
US	GM	Cadillac ELR	17,1	64	64	66.067	57.266	LG Chem	NMC
US	Ford	Ford C-MAX	7,6	34	34	28.335	28.335	Sanyo	NMC
US	Ford	Ford Fusion	7,6	32	32	35.227	31.686	Sanyo	NMC
US	GM	Opel Ampera	16	83	83	43.900	38.620	LG Chem	NMC
US	Fisker	Fisker KARMA	20	80	80	101.800	101.800	A123	LFP
CN	Geely	S60/V60 (Volvo Cars (2011-))	11,2	50	50	66.012	66.012	LG Chem	NMC
CN	BYD	BYD Qin	13	70	70	26.636	26.636	BYD	LFP
CN	BYD	BYD Tang	18,4	80	80	39.266	39.266	BYD	LFP
CN	SAIC	Roewe 550	11,8	58	58	34.916	34.916	andere China	LIB
CN	BYD	BYD F3DM	16	100	100	23.829	23.829	BYD	LFP

PROGNOSEN FÜR DIE ENTWICKLUNG DES ZELLBEDARFS UND DER ZELLPRODUKTION

Prognosen für die Entwicklung der weltweiten BEV- und PHEV-Verkäufe bis 2025 liegen gegenüber den rund 0,5 Millionen in 2015 bei 1 bis 2 Millionen oder mehr in 2020 und 2 bis 8 Millionen in 2025 (Abbildung unten). Unter der Annahme einer reichweitenoptimierten Auslegung der Elektrofahrzeuge (diese lässt sich besonders für BEV anhand der Ankündigungen erster OEM erkennen, welche ab 2020 Modelle mit 500 Kilometer Reichweite in den Markt bringen möchten) ergibt sich bis 2020 eine potenzielle Nachfrage von 40–60 GWh und bis 2025 100–300 GWh Zellkapazität. Neben den Verkaufszahlen stellt also auch die sich ändernde Batteriegröße eine Variable für die Zellanfrage dar (es gibt daher auch konservativere Prognosen bis zu 50 GWh in 2025, ebenso kann es vereinzelt noch optimistischere Prognosen geben. Zum Vergleich sind neben der Zellanfrage auch Ankündigungen von Zellherstellern (etablierte und

potenziell neue) zum Aufbau von Produktionskapazitäten in den Abbildungen eingetragen. Hierbei ist aber offen, ob diese (jenseits der bereits laufenden Vorhaben von z. B. Tesla Motors Inc.) wirklich (in diesem Zeitraum) aufgebaut werden. Ebenso werden (im Wesentlichen) die heute etablierten OEM und Zellhersteller die Marktentwicklungen beobachten und zeitnah reagieren, so dass in den kommenden Jahren sicherlich dynamisch/kurzfristig mit weiteren Ankündigungen weiterer „Gigafabriken“ und Elektrofahrzeugproduktionen jenseits 100 000 Stück pro Jahr zu rechnen ist. Denn Zellhersteller und OEM werden im Voraus gut planen müssen, um Angebot und Nachfrage zukünftig abstimmen und Produktionsstätten auslasten zu können. Die hier sichtbaren Überkapazitäten (Differenz der Kapazitäten gegenüber der Nachfrage) dürften wohl frühestens ab 2020 abgebaut sein, dann kann die Marktnachfrage aber schnell steigen.

Weltweite Verkaufsprognose für BEV und PHEV bis 2025²⁸



**Jährlicher globaler LIB-Zellbedarf gemäß Verkaufsprognosen im reichweitenoptimierten Szenario (grün)
vs. angekündigter Ausbau von Produktionskapazitäten²⁹**



**Kumulierter globaler LIB-Zellbedarf gemäß Verkaufsprognosen im reichweitenoptimierten Szenario (grün)
vs. angekündigter Ausbau von Produktionskapazitäten²⁹**



SZENARIEN DER ELEKTROMOBILITÄT

Aus der Entwicklung der Elektrofahrzeugverkäufe in den letzten Jahren lässt sich nicht nur der Beginn der Elektromobilität und steigende Neuzulassungen, sondern auch ein Abfallen der Wachstumsraten ermitteln, welches sich in den kommenden Jahren auf einem bestimmten Niveau einpendeln dürfte. Dies ist z. B. bei etablierten, reiferen Technologien deutlich und liegt üblicherweise nicht über 10 bis 15 Prozent (eher deutlich unter 10 Prozent), da hiermit ja stetig wachsende Verkaufszahlen auf immer größerem Niveau verbunden wären.

Für die weltweiten BEV/PHEV-Verkäufe zeigt sich ein Abfallen der Wachstumsraten von 700 Prozent in 2011 (bei 5000 verkauften BEV und PHEV) bis hin zu 40 bis 50 Prozent in 2014/2015 (bei 0,3 bis 0,5 Millionen verkauften BEV und PHEV). Eine Fortschreibung dieser Wachstumsverringerung bis 2020 dürfte im optimistischen Fall Wachstumsraten um 30 Prozent ergeben („Pro EV-Szenario“) und im pessimistischen Fall ggf. nur noch 15 Prozent („Contra EV-Szenario“).

Rechnet man diese Wachstumsraten auf Neuzulassungen um (Wachstumsraten von 2020 werden dann beibehalten), so ergeben sich BEV- und PHEV-Neuzulassungen von 1 bis 2 Millionen in 2020, 2 bis 8 Millionen in 2025 (vgl. Prognosen unterschiedlicher Marktanalysten) und 4 bis 32 Millionen in 2030. Aus Beobachtungen von Wachstumsraten in anderen Anwendungen z. B. vergleichbarer Technologien ist bekannt, dass 30 Prozent Wachstum über mehrere Jahre eine sehr hohe Zahl darstellen und nicht dauerhaft aufrechterhalten werden. In diesem Fall wäre eine globale Diffusion (ca. 100 Prozent der Neuzulassungen durch Elektroautos) bereits 2035 erreicht. Gleichzeitig würden aber auch dauerhafte Wachstumsraten von rund 15 Prozent zu einer Diffusion noch vor 2060 führen. Somit stellt sich ganz langfristig gesehen lediglich die Frage, ob eine breite Diffusion 20 Jahre früher oder später kommt. Angesichts energie- und klimapolitischer Ziele ist natürlich eine möglichst frühzeitige Diffusion wünschenswert. Die folgenden Szenarien sollen dabei helfen, die hierbei möglichen Entwicklungen greifbarer zu machen, so dass zukünftige Maßnahmen und ggf. Instrumente besser darauf ausgerichtet werden bzw. diese im besten Fall positiv beeinflussen können.

Das „Trendszenario“ (rund 20 Prozent durchschnittliches Wachstum) führt dabei zu einer globalen Diffusion der Elektromobilität zwischen 2040 und 2050 und wird daher als ein realistisches Szenario betrachtet, in welchem es möglich sein dürfte, alle erforderlichen Rahmenbedingungen zur Umsetzung der Elektromobilität sorgfältig vorzubereiten.

Für den weltweiten Bestand von Elektrofahrzeugen ergeben sich im Rahmen dieser Szenarien bis 2020 10 bis 30 Millionen und bis 2030 30 bis über 120 Millionen Elektrofahrzeuge (gegenüber dann ggf. 125 Millionen PKW-Neuzulassungen und 1,5 Milliarden PKW im Bestand, das heißt wenige Prozent bis rund 10 Prozent Anteil von Elektrofahrzeugen).

Wie bereits bzgl. des Status Quo der Elektromobilität in Deutschland gezeigt, liegen die Neuzulassungen und der Bestand jeweils durchschnittlich bei rund 5 Prozent im weltweiten Vergleich. Daher ist für die Neuzulassungen und den Bestand auf der jeweils rechten Seite der Abbildungen eine Skala für Deutschland eingetragen. Die Szenarien umfassen hierbei die zuvor für die Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland fortgeschriebenen Werte. Das Ziel von 1 Million Elektrofahrzeugen in Deutschland dürfte demnach um 2025 (Trendszenario) erreicht sein, auf jeden Fall jedoch vor 2030.

Für die drei Szenarien lassen sich nun weiter durch den Einbezug der Batteriegröße in einem Elektroauto Szenarien für den Zellbedarf entwickeln. Aus den kumulierten Fahrzeugverkäufen von über 1 Million und Zellverkäufen von rund 25 GWh zeigt sich, dass bislang BEV/PHEV-Batterien um 25 kWh je Fahrzeug eingesetzt werden. Gleichzeitig zeigt der Trend, dass OEM zunehmend größere Batteriekapazitäten verbauen.

Daher wird als optimistischste Abschätzung im „Pro EV-Szenario“ mit 50 kWh (also einer Verdopplung der Batteriekapazität im globalen Durchschnitt) und im „Contra EV-Szenario“ weiterhin mit 25 kWh Batteriekapazität für eine untere Grenze gerechnet. Für 2025 ergeben somit beispielsweise 50–400 GWh Zellnachfrage, was die zuvor gezeigten Marktprognosen alle umfasst.

Für das Trendszenario wird sowohl mit 25 kWh als auch 50 kWh Batteriegröße gerechnet. Für 2025 ergeben sich damit Werte zwischen 100 und 200 GWh. Dies dürften neben den darüber liegenden extrem optimistischen und den darunter liegenden sehr konservativen Abschätzungen ein durchaus realistischer Entwicklungsbereich für die zukünftige globale Zellenachfrage von Elektrofahrzeugbatterien sein (allerdings wäre eine geringere Nachfrage nicht ganz auszuschließen).

Als plausible Entwicklung in den nächsten Jahren ist hiervon ausgehend mit einer schrittweisen Erhöhung der Batteriekapazitäten in Elektrofahrzeugen zu rechnen. Im Durchschnitt aller OEM,

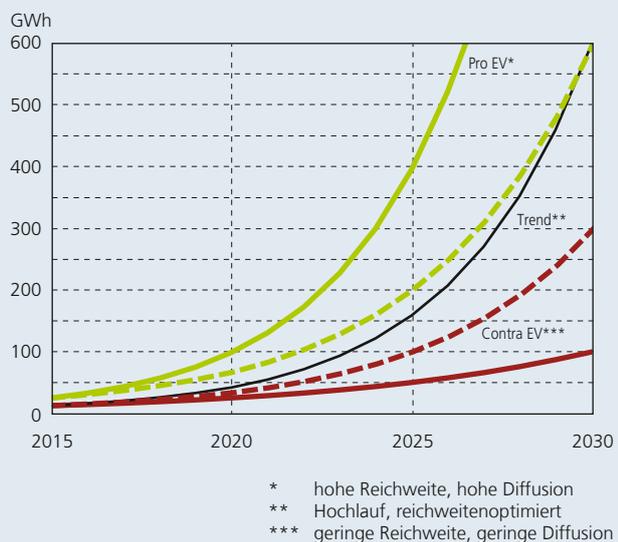
Fahrzeugmodelle und Verkaufszahlen sollte sich eine solche Entwicklung dadurch zeigen, dass sich die Zellenachfrage in Zukunft zunehmend von einem heutigen „Contra EV-Szenario“ hin zu dem „Pro EV-Szenario“ bewegt.

Für die folgenden Berechnungen werden daher zwei Konzepte bzw. Fahrzeugmodelle unterschieden: Das kostenoptimierte Modell, in welchem die Batteriegröße beibehalten wird und sich eine Kostenreduktion durch die Batterie direkt auf den Fahrzeugpreis auswirkt sowie das reichweitenoptimierte Modell, in welchem die Kostenreduktion der Batterie zugunsten einer Erhöhung der Batteriegröße umgelegt wird.

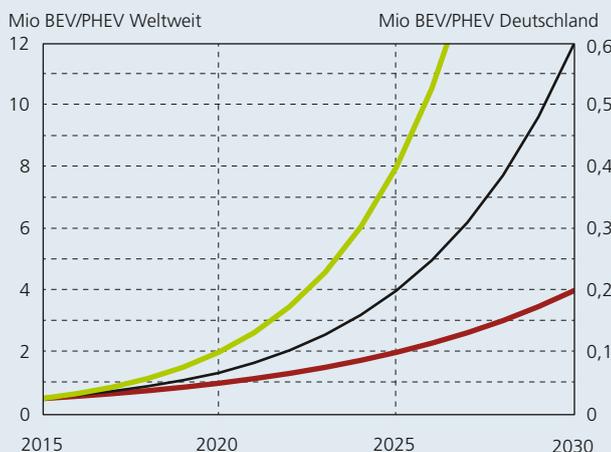
Wachstum der BEV/PHEV Verkäufe weltweit



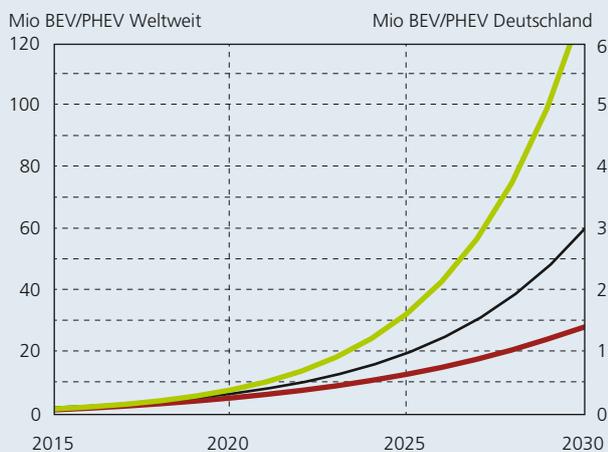
Szenarien der Entwicklung des LIB-Zellbedarfs für Elektrofahrzeug (global)



Szenarien der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen (Weltweit und DE)



Szenarien des Elektrofahrzeugbestands (Weltweit und DE)



--- optimistisch — Trend — konservativ — Contra EV — Pro EV

KOSTEN- VS. REICHWEITENOPTIMIERTE ELEKTROMOBILITÄT

Die bisherigen Auswertungen der meistverkauften Elektrofahrzeugmodelle, welche im Wesentlichen den heutigen globalen Bestand von über 1 Million BEV und PHEV ausmachen, zeigen im Falle der BEV, dass heute zwei Typen von rein batterieelektrischen Fahrzeugen am Markt verfügbar sind: Elektrofahrzeuge mit 15–30 kWh Batteriegröße für 15 000 bis 35 000 € haben eine begrenzte Reichweite von 150 bis 250 Kilometer. Im Durchschnitt sind die BEV in den letzten Jahren von rund 31 000 € auf 29 000 €³⁰ und damit rund 5 Prozent (im Einzelfall bis 30 Prozent) gesunken, ohne Änderung der Batteriekapazität („Kostenoptimiertes Modell“). Eine weitere Kostenreduktion ist in der Zukunft zu erwarten, sowohl durch eine Kostenreduktion der Batterie, aber auch sonstige ingenieurstechnische Verbesserungen und Skaleneffekte.

Daneben gibt es Elektrofahrzeuge mit 60 bis über 90 kWh (wie den BYD e6 und das Tesla Model S), welche von 50 000 bis 60 000 € aufwärts (je nach Batteriegröße) schließlich 300 bis 500 Kilometer Reichweite erzielen.

Um einen Einstieg in den Massenmarkt zu erreichen, ist es die Strategie von Tesla Motors Ltd., durch Skaleneffekte nun auch die Batteriepreise der für Elektrofahrzeuge von Panasonic Corp. optimierten kleinformatigen Zellen noch deutlich zu senken. Hierdurch sollen die Kosten in den nächsten zehn Jahren sogar unter 100 US\$/kWh (Zellkosten) fallen. Nach Angaben von Tesla Motors Ltd. liegen die Batteriekosten bereits heute bei weniger als einem Viertel des Fahrzeugpreises (beispielsweise im Tesla Model S mit 70 kWh Batteriepack und heute 240 US\$/kWh entspräche dies rund 17 000 US\$ Batteriekosten von rund 70 000 US\$ Fahrzeugkosten).³¹ Das für 2017/2018 angekündigte Tesla Model 3 soll in den USA ab 35 000 US\$ und mindestens 320 Kilometer Reichweite angeboten werden.³² Dies kann per Definition durch die Batterie alleine nicht gelingen und wird sicherlich auch mit einer einfacheren Ausstattung, technischen Verbesserung zur Kostenreduktion und Skaleneffekten in der Automobilproduktion zu erreichen sein. Gegenüber dem „Premium-Modell“ von Tesla wie z. B. einem auf 90 kWh ausgelegten hochpreisigen Modell mit hoher Reichweite wird auch ein zukünftiges „Basis-Modell“ mit 60 kWh und entsprechend reduzierten Kosten in die folgenden Berechnungen mit einbezogen.

Während bei den Kosten nicht die Batterietechnologie alleine für die Senkung der Fahrzeugpreise verantwortlich ist, kann auch die Reichweite neben einer erhöhten Energiedichte (dies reduziert das Gewicht bzw. es kann zusätzliche Batteriekapazität zugebaut werden) durch ingenieurstechnische Optimierung am Fahrzeug verbessert werden.

Hier konnten BEV (nach Verkäufen liegt die durchschnittliche Batteriegröße bei 31 kWh, nach Modellen ausgezählt bei 25 kWh, der Verbrauch wurde für jedes Modell einzeln berechnet und dann gemittelt) ihre Reichweite von 160 Kilometer auf 180 Kilometer bei unveränderter Batterietechnik erhöhen. Das entspricht einer Verbesserung im Verbrauch von 7,3 auf 7,8 km/kWh in den Jahren seit der Markteinführung (über 2 Prozent Optimierung pro Jahr). Eine Fortschreibung dieser Verbesserungspotenzials bis 2030 führt zu den in der Tabelle auf Seite 7 aufgeführten Angaben. Insgesamt kann aber eine Verbesserung um den Faktor 2 im Verbrauch möglich sein, weshalb sich die Potenziale zur Reichweiten-Verbesserung somit durch Verbrauchs- und Batterieoptimierung zusammensetzen. Dabei ist auch festzuhalten, dass der Verbrauch eines Tesla Model S deutlich schlechter ist und bei nur 5 bis 6 km/kWh liegt.

Ähnlich ist auch für PHEV festzuhalten, dass die Modelle mit durchschnittlich 11 kWh Batteriegröße seit Markteinführung nur um rund 2 Prozent von über 58 000 auf rund 57 000 € (Durchschnitt, im Einzelfall um 20 Prozent) gesunken sind. Das Preisniveau ist hier insgesamt deutlich höher als bei BEV. Der Verbrauch der im Schnitt 50 Kilometer vollelektrisch fahrenden PHEV konnte nur unwesentlich von 4,6 auf 4,7 km/kWh verbessert werden und wird vermutlich auch langfristig nur 5–6 km/kWh erreichen, bis schließlich BEV dieses Konzept (so wie zuvor HEV) ablösen.

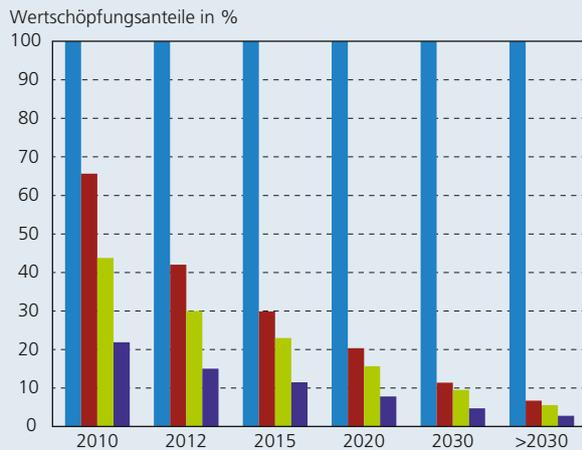
Aus den ermittelten Werten für BEV-Kosten und -Reichweiten sowie deren Optimierungspotenzialen lassen sich schließlich die unterschiedlichen Ansätze des „Kostenoptimierten Modells“ mit gleichbleibend 25 kWh Batteriekapazität dem „Tesla Premium-Modell“ mit 90 kWh und dem „Tesla Basis-Modell“ mit 60 kWh und deutlich reduzierten Preis gegenüberstellen. Ausgehend von den heutigen Modellen mit geringer Reichweite wird hier nun ein „Reichweitenoptimiertes Modell“ aufgezeigt, welches versucht, die Kosten in einem Bereich von maximal 150 Prozent oberhalb eines heute vergleichbaren konventionellen PKW zu bringen und dabei versucht, sukzessive die Reichweite zu erhöhen, ohne das BEV teurer zu machen.

Die Ergebnisse (Abbildung Seite 23 unten) zeigen, dass gerade zwischen 2020 und 2030 das reichweitenoptimierte Modell gegenüber dem für den Volumenmarkt optimierten „Tesla Basis-Modell“ zunehmend Vorteile bringt und sich bis 2030 und später vollkommen den Kosten und Reichweiten konventioneller Fahrzeuge annähern kann. Bis dorthin werden sicherlich kostenoptimierte BEV mit ebenso besseren Reichweiten jenseits 300 Kilometer einen breiten Markt für Einsatzzwecke mit kürzeren Fahrstrecken einnehmen. Ob sich ein teures BEV sehr hoher Reichweite langfristig bei einer solchen Entwicklung des Fahrzeugangebots noch halten kann, ist dann jedoch fraglich.

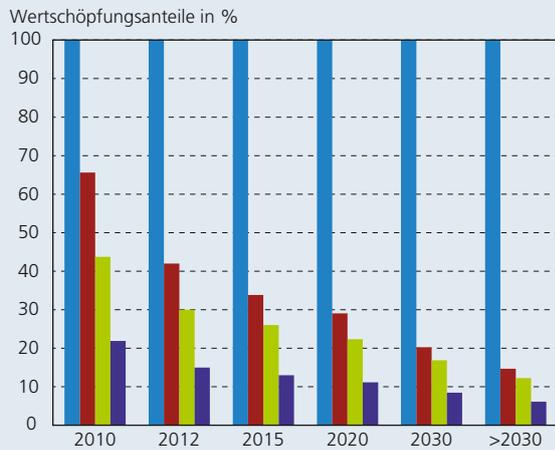
Veränderung der Wertschöpfung durch die Batterie

Hinsichtlich der Wertschöpfung am Elektrofahrzeug zeigt das kostenoptimierte Modell die entsprechend höheren Kostenreduzierungspotenziale der Batterien. Bis 2030 dürften die Pack- und Zellkosten bei durchschnittlich 10 Prozent Wertschöpfung am Fahrzeug liegen und später darunter fallen. Im reichweitenoptimierten Modell liegen die Zell- und Packkosten auch jenseits 2030 noch über 10 bzw. 15 Prozent. Die Materialkosten dürften sich jenseits 2030 zunehmend den Zellkosten angleichen. Sie sind hier vereinfacht noch prozentual zu den Zellkosten über die Jahre unverändert gelassen (hier wird zukünftig weitergehende Information von Herstellern benötigt).

Kostenoptimiert

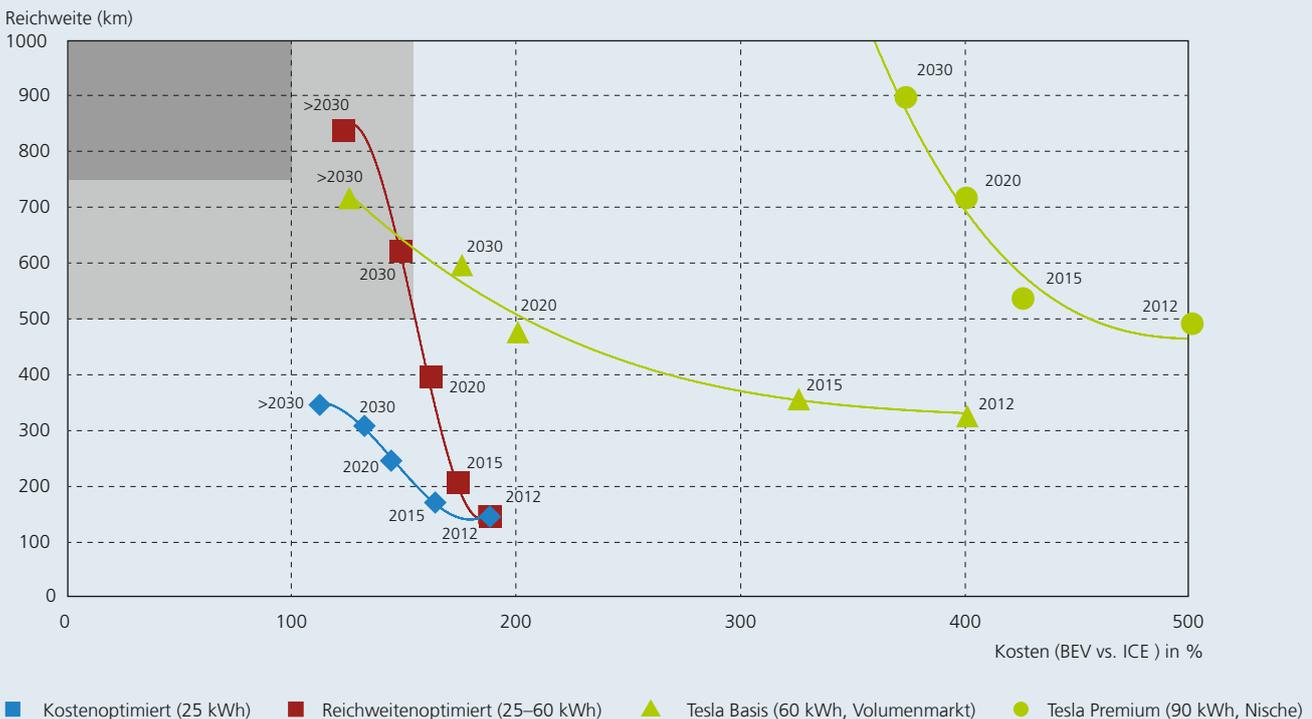


Reichweiteoptimiert



- Basispreise BEV
- Packkosten
- Zellkosten
- Materialkosten 50 %

Reichweite- vs. Kostenoptimierte Elektromobilität



KOSTEN, REICHWEITE, INFRASTRUKTUR

Um Elektromobilität für den Massenmarkt tauglich zu machen und eine breite Diffusion zu erreichen, müssen sich nicht nur Kosten und Reichweite an das Niveau konventioneller Fahrzeuge angleichen, sondern auch die Infrastruktur für ein schnelles und flächendeckendes Aufladen der BEV gegeben sein.

Die einzelnen Konzepte haben bereits gezeigt, dass die ersten Ansätze eines „Kostenoptimierten Modells“ zwar helfen, um frühzeitig für eine breitere Käuferschicht bezahlbare (kleinere) Elektrofahrzeuge auf den Markt zu bringen, diese jedoch in der Reichweite aber auch hinsichtlich eines schnellen Aufladens eingeschränkt sind.

Umgekehrt sind mit dem „Tesla Premium-Modell“ hohe Reichweiten der Elektrofahrzeuge über 500 Kilometer möglich (80–100 kWh), jedoch liegen die Kosten der Autos bei 80 000 bis 100 000 US\$ und selbst bei Laden mit Superchargern (ca. 135 kW) benötigt man über eine halbe Stunde, um auf 80 Prozent aufzuladen.

Daher wird neben der Bewertung der Reichweite und Kosten als weiteres Kriterium das Tanken bzw. die Schnellladefähigkeit hinzugezogen, um die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Auslegungen miteinander vergleichen zu können. Diese drei Kriterien können wie gezeigt sehr unterschiedlich sein und erst wenn sie alle gemeinsam erfüllt sind, lässt sich von einer Annäherung an eine Mobilität wie mit konventionellen Fahrzeugen sprechen.

Um schließlich einen solchen Vergleich anzustellen, werden die Kosten eines BEV auf die typischen Kosten eines herkömmlichen Automobils mit Verbrennungsmotor der entsprechenden Kategorie bezogen (z. B. 10 000 Euro-Kleinwagen oder 20 000 Euro-Mittelklassewagen).

Die Reichweite der BEV wird auf etwa 750 Kilometer (nominal) bezogen und für das Laden wird mit einer vergleichbaren und für Fahrzeugfahrer akzeptablen Dauer für das Tanken von Benzin mit 5 bis 10 Minuten (hier als Referenz: 6 Minuten) gerechnet. Da bei dem Schnellladen die Batterie jedoch nur auf 80 Prozent der Batteriekapazität geladen werden kann, entspricht der beste erreichbare Wert nur 125 (statt 100).

Bezüglich der Ladeleistung wird für das Schnellladen von einer Erhöhung von 30 kW in 2012 auf 50, 60, 120 bis 240 kW zwischen 2015 und >2030 ausgegangen. Für das „Supercharging“ werden 90 kW in 2012 und 135, 150, 200, 600 zwischen 2015 und >2030 angenommen. Die Annahmen liegen auch in dem

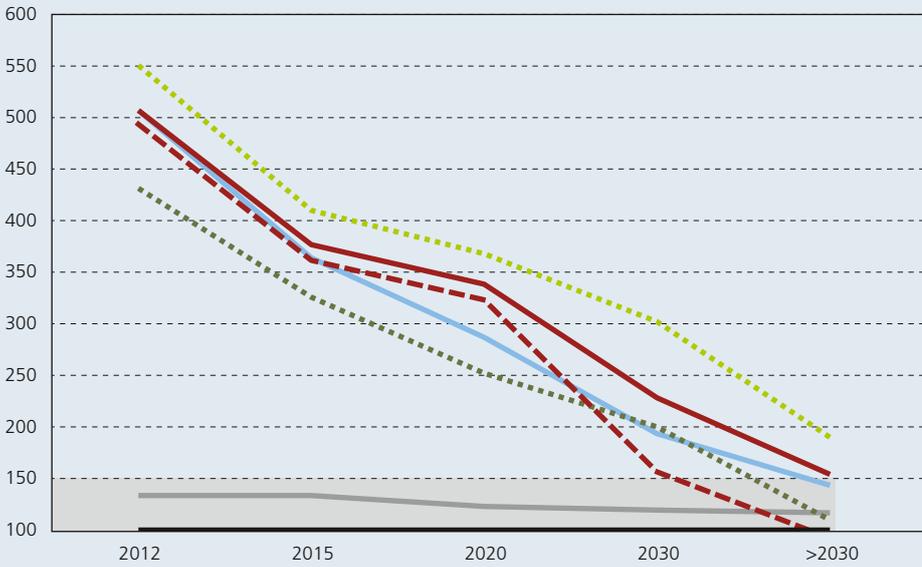
Bereich der Ausbauziele des Statusberichts der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) zur Ladeinfrastruktur. Demnach sollen in drei Stufen bis 2017 Schnellladepunkte mit 50 kW ausgebaut werden, nach 2017 ein Schnellladenetz auch mit 150 kW und mehr ausgebaut und ab 2020 zudem in Abhängigkeit der sich dann durchsetzenden Batterietechnik und Fahrzeuge perspektivisch um Ladepunkte mit 350 kW ergänzt werden.³³ Jenseits 2020 sind daher für die unterschiedlichen Ladepunkte mit 50 kW, 150 kW bis 350 kW (hier jedoch Einzelne im Vergleich zu den bis 2020 durch die NPE vorgeschlagenen 7100 Ladepunkten) Mittelwerte angenommen. Denn zu dem schnellen Laden wäre genaugenommen auch die gute Erreichbarkeit und flächendeckender Zugang zu Ladesäulen für Vergleiche zu berücksichtigen.

Der Vergleich der jeweiligen Konzepte untereinander sowie fortgeschrieben bis >2030 zeigt (unter Annahme der in dieser Roadmap erarbeiteten Werte und Entwicklungen für Batteriekosten, Fahrzeugkosten, Verbrauch, Reichweite und Schnelladefähigkeit etc.), dass in allen Variationen der Konzepte die drei Kriterien Reichweite, Kosten und Infrastruktur (z. B. Tanken/Laden) erst zwischen 2020 und 2030 gemeinsam realisierbar werden.

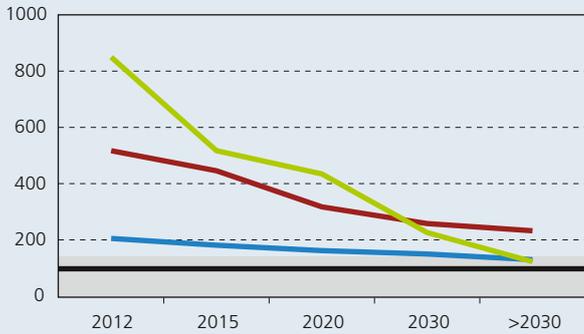
In einem „Tesla Premium-Modell“ bleiben die Kosten sogar langfristig auf einem sehr hohen Niveau, in dem „Kostenoptimierten Modell“ wird man langfristig auf eine eingeschränkte Reichweite bzw. eine festgelegte Nutzungsart (z. B. Pendler, kürzere Fahrten etc.) eingeschränkt bleiben. Der sogenannte „Tesla Basis-Modell“ mit rund 60 kWh Batteriekapazität führt jenseits 2030 dazu, dass alle Kriterien sich dem Niveau von 100 annähern. In dem „Reichweitenoptimierten Modell“ ermöglicht erst der Übergang von einem Schnellladen auf das Supercharging-Konzept (vgl. den Ansatz der NPE mit 350 kW jenseits 2020, um höheren Batteriekapazitäten gerecht zu werden), alle drei Kriterien zu erfüllen und sich dem Niveau wie für konventionelle Fahrzeuge anzugleichen. Um 2020 zeigt sich z. B. eine Verschlechterung im Kriterium Infrastruktur, da von schrittweise erhöhten Batteriekapazitäten, aber noch keinen entsprechend angepassten Schnellademöglichkeiten auszugehen ist. Sicherlich lässt sich hier je nach Betrachtung eines einzelnen Fahrzeugmodells und der Auswahl eines Ladepunktes mit den Ergebnissen spielen. Diese sind daher in einem „globalen Flottendurchschnitt“ zu verstehen.

Für eine Gesamtbewertung der Konzepte werden alle drei Kriterien summiert und gemittelt. Auch insgesamt zeigt sich ein reichweitenoptimiertes Modell in Kombination mit Schnellladen bzw. Supercharging als langfristig attraktivstes Konzept, welches dann auch gegenüber der zusätzlich eingezeichneten Alternative des PHEV gewinnt.

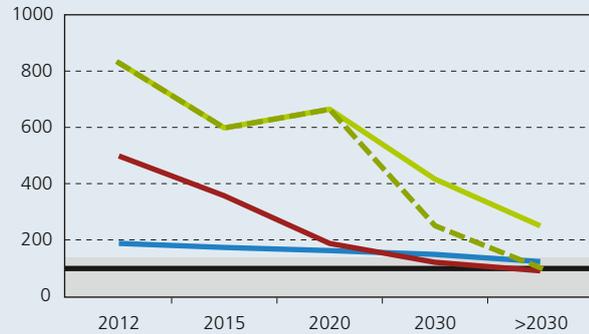
Elektrofahrzeugkonzepte im Vergleich Kosten – Reichweite – Tanken



Kostenoptimiert BEV



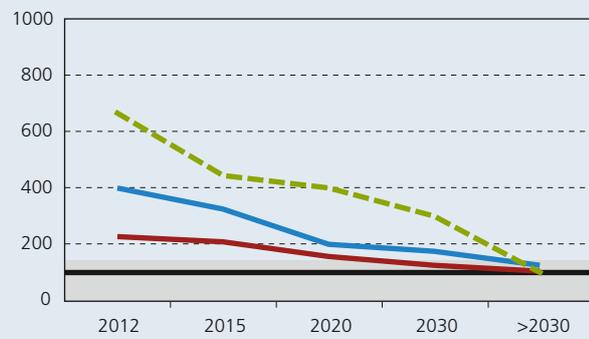
Reichweitenoptimiert BEV



Tesla Premium



Tesla Basis



— Kosten — Reichweite — Tanken — Tanken (Super) — Referenz = 100

RAHMENBEDINGUNGEN

Neben der rein technischen Entwicklung von Elektrofahrzeugen sowie besonders der Batterie als einer der Schlüsselkomponenten, entscheiden viele (auch nicht-technische) Rahmenbedingungen über den zukünftigen Erfolg oder Misserfolg der Elektromobilität und den Markthochlauf sowie die Diffusion von Elektrofahrzeugen im Konkreten. Hierzu zählen Aspekte wie politikseitige Regulierung/Gesetzgebung, Infrastruktur, Normung und Standardisierung, marktseitig die Preisentwicklung aber auch das konkrete Angebot, z. B. an Fahrzeugmodellen. Schließlich sind aber auch gesellschaftliche Aspekte bzw. Aspekte der Kundenakzeptanz ganz wesentlich.

Die in diesen Bereichen heute vorliegenden bzw. bis 2030 aus deutscher Perspektive (bzw. mit Relevanz für Deutschland/Europa) als realistisch zu erwartenden Rahmenbedingungen können förderlich oder hemmend wirken, können aber unter Umständen auch aus heutiger Sicht noch nicht eindeutig zuordnungsfähig sein bzw. beide Aspekte aufweisen. Sie werden im Folgenden diskutiert (wie in der Roadmap bis 2030 verortet):

REGULIERUNG / GESETZGEBUNG

In der Regulierung/Gesetzgebung sind nationale Bestimmungen (z. B. Sonderrechte für Elektromobile im Verkehr) von internationalen Bestimmungen auf EU-Ebene (z. B. bzgl. CO₂-Emissionen) und im globalen Umfeld (z. B. hinsichtlich Batterietransporten) zu unterscheiden. Die **CO₂-Gesetzgebung** in der EU spielt schon heute eine förderliche Rolle: Der Neuwagen-Flottendurchschnitt von 130 g CO₂/km in 2015 stellt die Ausgangssituation dar und gibt den Automobilherstellern in Europa einige Jahre Zeit, sich auf den Neuwagen-Flottendurchschnitt von 95 g CO₂/km in 2021 vorzubereiten. Da die Automobilindustrie praktisch vollständig globalisiert ist, muss natürlich auch die Gesetzgebung auf anderen Kontinenten beachtet werden und dort gesetzte, ggf. noch stärkere Anreize zur Produktion emissionsarmer bzw. elektro-mobiler Fahrzeuge beeinflussen auch die Forschung und Entwicklung in Europa sowie letztlich das Fahrzeugangebot auf dem europäischen Markt.³⁴ Langfristig und angesichts des fortschreitenden Klimawandels ist eine weitere Verschärfung der europäischen CO₂-Flottengrenzwerte für PKW zu erwarten.

Bezüglich der **Bestimmungen für Batterietransporte** auf der Straße sind reine Batterietransporte gemeint, also nicht die von Elektrofahrzeugen mit bereits eingesetzten Batterien. Der Aspekt ist zunächst neutral für die Elektromobilität einzustufen, denn eine direkte Marktrelevanz für potenzielle Kunden ist nicht gegeben. Lithium-Ionen-Batterien unterliegen in Deutschland der Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (GGVSEB) und werden europaweit in der in den Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) geregelt.³⁵ Für den Transport beschädigter Batterien wird im Moment noch eine Sondergenehmigung gebraucht, ansonsten stellen die Bestimmungen schon heute kein Problem mehr dar. Dieser Punkt wird weiterhin zu beobachten sein, wenn das Transportvolumen signifikant ansteigt und der Gesetzgeber ggf. reagiert. Auch für den Lufttransport gibt es mittlerweile Richtlinien, die von der International Civil Aviation Organization (ICAO) und der International Air Transport Association (IATA) veröffentlicht wurden.³⁶ Bei einem Markthochlauf und hohen nachgefragten Stückzahlen ist vielmehr zu beachten, dass eine Batterie(zellen)fertigung nahe an der Fertigung und dem Verkauf der Elektrofahrzeuge zu erwarten ist, um einen weiten Transport von Batterien in großem Umfang zu vermeiden. Diese Nachfrage ist heute aber noch nicht gegeben.

Sonderrechte (kommunal, Leuchttürme) gelten als förderlicher Aspekt für die Elektromobilität. Das im Jahr 2014 verabschiedete Elektromobilitätsgesetz gibt Kommunen die Möglichkeit, jeweils auf die lokale Situation angepasste Anreize für an Elektrofahrzeugen interessierte Kunden zu setzen, z. B. durch kostenfreies Parken oder spezielle Zufahrtsrechte für diese Fahrzeuge.³⁷ Wesentlicher Regelungsinhalt des Gesetzes sind die Definition der möglicherweise zu privilegierenden Elektrofahrzeuge, die Kennzeichnung über das Nummernschild, die Park- und Halte-regelungen, die Nutzung von Busspuren und die Aufhebung von Zufahrtsverboten. Langfristig bzw. wenn viele Kommunen aktiv geworden sind und die Sonderrechte im besten Fall allgemein gelten, wird ihre fördernde Wirkung wieder abnehmen. Eine „Zero Emission Vehicle“-Gesetzgebung wie im US-amerikanischen

Kalifornien stellt für Deutschland bzw. Europa keine Alternative dar (Stichwort: Verkaufsverbote für Fahrzeuge mit zu hohen Emissionen).³⁸ In diesem Kontext wurde allerdings das Instrument der „**Super credits**“ für weitgehend schadstofffreie Fahrzeuge mit unter 50 g CO₂/km in der flottenweiten Anrechnung von Elektromobilen auf die CO₂-Zielwerte insgesamt eingerichtet. Solche Elektromobile wurden gleich mehrfach gezählt und ihre Herstellung hätte damit als Ausgleichsmaßnahme für die Herstellung anderer Fahrzeuge mit höheren Emissionen dienen können.³⁹ Weil dieses Angebot in seiner ersten Phase allerdings nicht besonders stark durch die Automobilhersteller in Anspruch genommen wurde, wird es auch in einer zweiten Phase von 2020 bis 2023 wieder gelten. Die Maßnahme sollte einen stark förderlichen Aspekt für die Elektromobilität z. B. zur Bereitstellung eines breiten Fahrzeugangebotes darstellen.

Neue Emissionsgrenzwerte (z. B. Lärm, Luftschadstoffe) unter anderem für Innenstädte und verschiedene Antriebsarten (z. B. PKW) und andere Verkehrsträger (z. B. Binnenschiffe) werden für Dynamik auf dem Markt für Elektrofahrzeuge jeder Größe sorgen.

Das **Recycling von Batterien/Entsorgung** sowohl von Energiespeichern im Großformat als auch in großem Volumen spielt eine entscheidende Rolle für die Industrie, wo Kunden z. B. von Traktionsbatterien schon heute ein umfassendes Recyclingkonzept verlangen. Ein funktionierendes Recycling für großformatige Batterien wird den Produktkreislauf für die Schlüsseltechnologie der Elektromobilität schließen, den Materialverbrauch effizienter gestalten und sogar senken und damit auch Elektrofahrzeuge insgesamt nachhaltiger machen. Aus der Perspektive des Marktes für Elektromobilität ist dieser Aspekt allerdings als neutral eingestuft: Die Verantwortung für Rücknahme und Entsorgung von Altbatterien und Altakkumulatoren liegt grundsätzlich in den Händen der Hersteller, Importeure und Vertrieber.⁴⁰ Die Entsorgung von großformatigen Batterien ist aber noch nicht trivial, es gibt großen Lösungsbedarf – für private Kunden spielt es aber vor allem zu Beginn des Markthochlaufes noch keine große Rolle und die weitere Marktdurchdringung wird dieser Aspekt nicht beeinflussen.

Hinsichtlich des oft diskutierten „**Second life**“ von Fahrzeug-Batterien gibt es Demonstrationsprojekte und erste Studien, jedoch wird dies erst langfristig für Elektrofahrzeuge an Bedeutung gewinnen, da Fahrzeuge in hoher Stückzahl erst nach Nutzung (also 10 bis 15 Jahre später und dem Markthochlauf folgend) für ein „**Second life**“ zur Verfügung stehen werden.

Im Sinne der Rohstoffverfügbarkeit ist prinzipiell auch eine **Ressourcenstrategie** langfristig unabkömmlich, um die Versorgung mit ggf. kritischen Materialien sicherzustellen. Ein geregeltes Recycling von Batterien wird aber nicht nur einen Beitrag

zur genannten Versorgungsproblematik liefern, sondern auch die Akzeptanz in der Gesellschaft bzw. unter potenziellen Kunden steigern. Diese Ressourcenstrategie wird langfristig angepasst bzw. überarbeitet werden müssen, um der bis zum Jahr 2030 angesichts des fortgeschrittenen Markthochlaufes der Elektromobilität gestiegenen Nachfrage nach Rohstoffen gerecht zu werden.

PREISENTWICKLUNG

Hinsichtlich der Preisentwicklungen werden drei Faktoren genauer betrachtet: Der **Benzinpreis** liegt heute/2015 bei 1,30–1,60 € pro Liter. Liegt er auch langfristig noch in diesem Bereich, könnte sich dieser Aspekt hemmend auf die Elektromobilität auswirken, da besonders im Kraftstoffverbrauch geringe Fahrzeuge ein sehr günstiges und evtl. mit dem Tanken von Strom vergleichbares Preisniveau hätten (für Benziner positive Beispielrechnung: 1,3 €/l * 6 l/100 km = 7,8 €/100 km). Steigt der Benzinpreis über 1,80 € pro Liter und ggf. noch viel höher, so würde sich das förderlich auswirken, da Elektrofahrzeuge sich über ihre Lebensdauer hinweg immer besser rechnen und dies bereits bei den Kosten für das Tanken (Benzin vs. Strom) direkt spürbar wird.

Der **Strompreis** liegt heute/2015 auf einem Mittelwert von 0,29 € pro Kilowattstunde für Privathaushalte. Blicke er auch langfristig auf diesem Niveau, könnte sich dieser Aspekt förderlich auf die Elektromobilität auswirken, steigt er über 0,30 € pro Kilowattstunde bzw. deutlich höher, könnte sich dies hemmend auswirken (für Elektrofahrzeuge negative Beispielrechnung: 0,3 €/kWh * 20 kWh/100 km = 6 €/100 km). Allerdings wird sich der Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen zukünftig noch stark verbessern, so dass es wahrscheinlich ist, dass selbst bei gleichbleibenden Benzinpreisen und steigenden Strompreisen Elektrofahrzeuge bzgl. der Kosten für 100 Kilometer Reichweite immer besser abschneiden werden als Benziner.

Der **Batteriepreis** liegt heute/2015 noch vermutlich auf der Ebene von etwa 300 € pro Kilowattstunde für Endkunden oder höher. Jedoch liegen die Einkaufspreise der OEM bei weniger als 200 € pro Kilowattstunde (gemeint sind hier Zellpreise, diese sind aufgrund aktueller Überkapazitäten auf einem extrem niedrigen Niveau). Sinken diese Batteriepreise nicht weiter, so könnte sich dieser Aspekt hemmend auf die Elektromobilität auswirken. Es ist aber zu erwarten, dass die an Endkunden weiter gegebenen Preise weiterhin sinken werden und selbst die Zellpreise im Einkauf von Zellherstellern ein Kostensenkungspotenzial bis auf 100 €/kWh und darunter bis 2030 aufweisen, so dass sich die Preisentwicklung der Batterien förderlich auf die Verbreitung der Elektromobilität auswirken wird. Denn mit der Entwicklungen der Batteriepreise werden auch die Preise für Elektrofahrzeuge deutlich sinken. Dieser Trend ist bereits kurzfristig zu erwarten

ZEIT →		2015			KURZFRISTIG	MITTLFRISTIG	
RAHMENBEDINGUNGEN	Regulierung/Gesetzgebung	CO ₂ -Gesetzgebung EU: Neuwagen-Flottendurchschnitt von 130 g CO ₂ /km in 2015		Bestimmungen für Batterie-transport auf Straße	Sonderrechte (kommunal, Leuchttürme)	CO ₂ -Gesetzgebung EU: „Super credits“ für schadst.-freie Fzg. (unter 50 g CO ₂ /km)	
	Preisentwicklungen	Benzin 1,30-1,60 €/l	Haushaltsstrom: 0,29 €/kWh (2015, Mittelwert)	Batterien: >300 €/kWh (Endkunde, System) <200 €/kWh (OEM, Zellen)		Preise für Batterien und Elektrofahrzeuge sinken	
	Infrastruktur	Standardisierte Ladeinfrastruktur	Aufbau der Ladeinfrastruktur für PHEV/BEV (privat)			Netzintegration/ dyn. Stromtarife	Aufbau (mittelfristig)... Öff. Ladestationen
	Normen/Standards	Ladestecker-/ Sicherheitsnorm	Genormte Zellen für HEV-/PHEV-/BEV-Batteriemodule			Harmonisierung der Gesetzgebung	Verschärfte Testbedingungen
	Kundenakzeptanz	Sicherheit des Fahrzeugs	Sicherstellung Strom aus Ern. Energien	Monetäre Kaufanreize (z. B. über Steuern)	Nicht-monetäre Kaufanreize (z. B. Busspurnutzung)	Neue Mobilitätskonzepte, breitere Angebote, sinkende xEV-Preise	
	Fahrzeugangebot	Eigene xEV Plattformen und „purpose Design“ (auch für gewerb. Anwend.)			Fahrspaß/Design/ Alltagstauglichkeit	Zunehmende Breite des Fahrzeug-Angebots	

bzw. zeichnet sich seit Einführung der ersten Elektrofahrzeugmodelle schon ab und wird sich weiterhin fortsetzen (siehe hierzu Lernkurven in der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“).

INFRASTRUKTUR

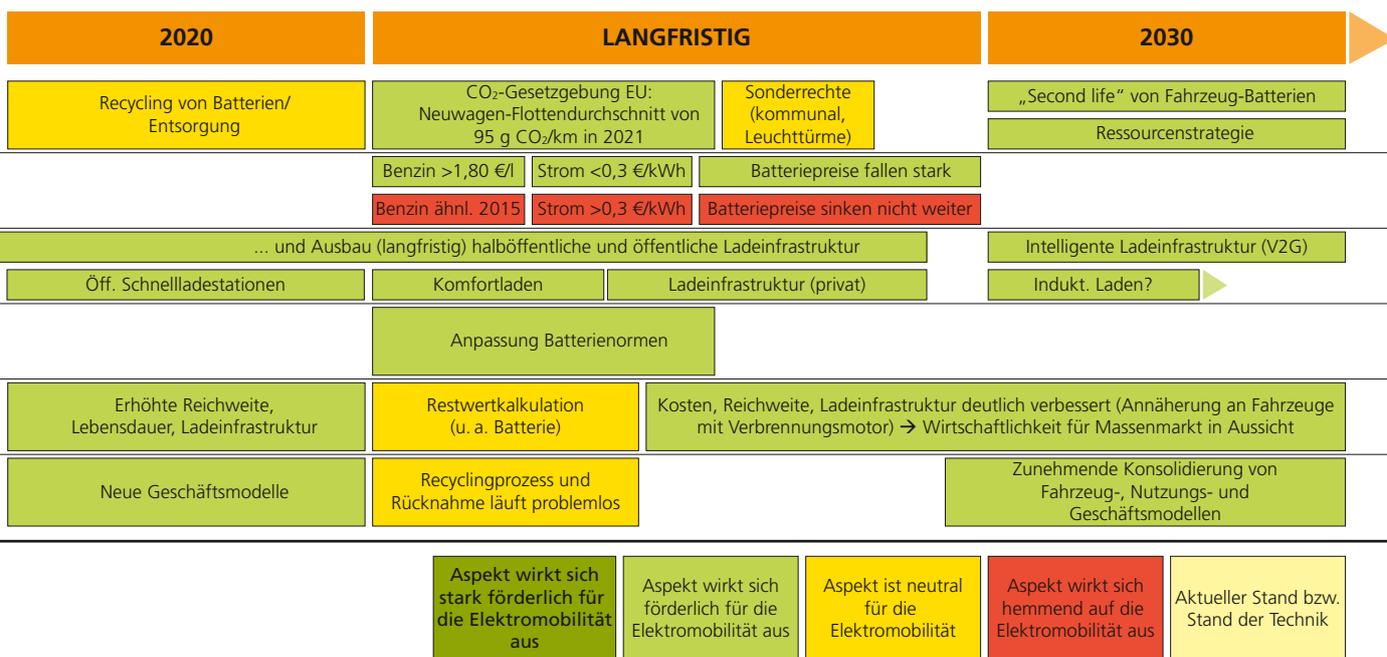
Eine **standardisierte Ladeinfrastruktur** wirkt sich bereits heute förderlich für die Elektromobilität aus, wenn Elektromobile jeder Marke an allen Ladestationen in Deutschland sowie Europa aufgeladen werden können.

Der Aufbau von **Ladeinfrastruktur für PHEV/BEV (privat)** als Ausgangsbasis hin zu einer breiten Diffusion von Elektrofahrzeugen hat bereits begonnen und wird sich über die nächsten Jahre hinweg fortsetzen. Aktiv werden hier vor allem Supermärkte bzw. Tankstellen oder Freizeiteinrichtungen, welche ihre Kunden damit „anziehen“ möchten, Industrieunternehmen oder Energieversorger investieren allerdings höchstens im Rahmen von Demonstrationsprojekten, was auch auf die öffentliche Hand zutrifft. Weil der Ausbau nicht schnell genug läuft, sind kurzfristig Engpässe hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Ladekapazität zu erwarten. Dieser Aspekt gilt vorerst noch als neutral für die Marktentwicklung der Elektromobilität, denn nur weil z. B. der lokale Supermarkt eine Ladestation für Elektrofahrzeuge anbietet, wird ein Käufer nicht den Mehrpreis im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor bezahlen. Diese Wahrnehmung wird sich aber über die Jahre bzw. **langfristig** mit der zunehmenden Flächenabdeckung einer problemlos zugänglichen Infrastruktur ändern, insbesondere auch dann, wenn der Kauf und Betrieb eines Elektromobils für breite Kundenschichten

wirtschaftlich wird. Spätestens dann wird es auch im Sinne aller anderen Industrieunternehmen und Handelseinrichtungen sein, wenn Automobilhersteller die noch vorhandene Vielfalt unterschiedlicher Ladestecker-Normen beseitigt haben und nicht mehr dazu nutzen, um die eigenen Kunden an die vom eigenen Unternehmen bzw. in Zusammenarbeit mit ausgewählten Partnern betriebenen Ladestationen zu binden. Sicherheitsnormen sind bereits umfassend dokumentiert^{39,40} und werden an den öffentlich zugänglichen Ladestationen umgesetzt.

Die **Netzintegration/dynamische Stromtarife**, also unterschiedliche Angebote eines Energieversorgers zu unterschiedlichen Tageszeiten bzw. mit unterschiedlichen Preisen und private Kunden entscheiden selbst, wann sie z. B. ihr Elektromobil aufladen möchten, gelten als förderlicher Aspekt für die Elektromobilität: Je früher sie zur Verfügung stehen, desto besser. Sie würden die Marktentwicklung beschleunigen, da durch den größeren Wettbewerb die Preise für private Stromverbraucher sinken.

Öffentliche Ladestationen gelten als förderlicher Aspekt, nicht zuletzt, weil sie die Aufmerksamkeit für bzw. Wahrnehmung der Elektromobilität stärken. Der Aufbau einer halböffentlichen und der öffentlichen Ladeinfrastruktur mit einem nennenswerten Umfang wird erst mittelfristig beginnen und langfristig ausgebaut werden, er stellt die Grundlage zur Erleichterung des Betriebs von Elektrofahrzeugen in Deutschland dar. Die Verzögerung im Aufbau ist unter anderem auch auf Haftungsfragen bei Unfällen z. B. mit dem Ladekabel zurückzuführen, weshalb eine flächendeckende private Ladeinfrastruktur erst langfristig zu erwarten ist und mit einem erfolgreichen Markthochlauf der Elektromobilität einhergeht.



Ein breiterer Ausbau **öffentlicher Schnellladestationen** ist ebenfalls ab 2020 zu erwarten und stellt einen förderlichen Aspekt für die Elektromobilität dar. Mit einer Verbreitung bereits angekündigter Elektrofahrzeuge mit 500 Kilometer Reichweite wird die Nachfrage nach bzw. Erwartung an deutlich geringere Lade- bzw. Wartezeiten steigen. Daher sind bereits heute Batterien mit Schnelladefähigkeit (mindestens 3C) Entwicklungsthema. Bezüglich der zyklischen Lebensdauer liegen hier noch FuE Herausforderungen vor. Auch Schnellladestationen jenseits 130–160kW sind damit in der Diskussion (um z. B. in 15 Minuten eine Fahrzeugbatterie auf 40kWh und damit bis 2020 z. B. für weitere 400 Kilometer aufzuladen – optimistische Rechnung). Die hohen Investitionskosten schrecken allerdings heute noch viele potenzielle Investoren ab.

Langfristig wird das **Komfortladen** als weiterer förderlicher Aspekt angesehen: Wenn Kunden z. B. nicht mehr mit einem großen, schweren Kabel selbst hantieren müssten, wäre das sofort als positiver Trend zu bewerten. Die Handhabung, Abrechnung, etc. muss sich also deutlich vereinfachen.

Jenseits 2030 könnte dann auch eine **intelligente Ladeinfrastruktur** auf- und ausgebaut werden, welche die Elektrofahrzeuge in das Stromnetz der Zukunft integriert („vehicle to grid“, Abk. V2G). Gleichzeitig dürfte das induktive Laden dann den nächsten Schritt in der Weiterentwicklung zu einer komfortablen Ladeinfrastruktur darstellen und neben einem Trend zu hohen Batteriekapazitäten für hohe Reichweiten ggf. auch neue, weitere Impulse wieder für Fahrzeuge mit geringer Batteriegröße geben.

NORMEN/ STANDARDS

Aus dem globalen Umfeld der Elektromobilität resultieren auch Normen/Standards, welche bis hinunter auf die nationale Ebene bzw. von der Fahrzeugindustrie in einem Land umzusetzen sind. Schon kurzfristig wird deshalb die **Ladestecker-/Sicherheitsnorm** förderlich für die Elektromobilität, denn sie wird für private Kunden einfacher handhabbar, wenn für das Laden eines Elektromobils an unterschiedlichen Ladesäulen bzw. zu Hause ein und dasselbe Ladestecker-Format eingesetzt werden kann.

Genormte Zellen für HEV-/PHEV-/BEV-Batteriemodule könnten eine wichtige Voraussetzung dafür sein, die Produktionskosten für die deutschen Automobilhersteller in Zusammenarbeit mit ihren zumeist asiatischen Zulieferern niedrig zu halten. Sie stellen heute/2015 allerdings noch eine enorme Herausforderung für die Automobilindustrie dar, denn die Frage ist, wie genau der Weg hin zu einer standardisierten Batterie für eine konkrete Anwendung aussieht: Welches nationale oder internationale Gremium befasst sich damit, wie und bis wann? Als Konsens steht fest, dass eine Massenproduktion von normierten Zellen in Deutschland frühzeitig aufzubauen eindeutig zielführend wäre. Gleichzeitig könnte es auch über größere Stückzahlen die Batteriekosten ggf. erheblich reduzieren, was sich über sinkende Batterie- und Elektrofahrzeugpreise auch auf die Kundenakzeptanz von Elektromobilität auswirken würde. Nur durch Letzteres entsteht ein Kaufanreiz für private Kunden und Impulse für die Marktentwicklung, weshalb die genormten Zellen aus heutiger Sicht erst einmal als neutral einzustufen sind.

Eine **Harmonisierung der Gesetzgebung** bzw. von Normen/Standards zwischen maßgeblichen Märkten auf verschiedenen Kontinenten könnte sich fördernd für die Marktentwicklung der Elektromobilität auswirken. Von der zeitlichen Einordnung her ist dies ein allgemeingültiger Aspekt in dem Sinne, dass er sich sofort förderlich für die Elektromobilität auswirkt, wenn Schritte zur Harmonisierung eingeleitet werden.

Verschärfte Testbedingungen, wie sie vor allem in China diskutiert werden bzw. schon in den nächsten Jahren zu erwarten sind, werden als potenziell hemmender Faktor für die Elektromobilität eingeschätzt.

Eine Bestandsaufnahme und Neubewertung vorhandener Normen/Standards sowie eine eventuell notwendige **Anpassung der Batterienormen** ist langfristig anzuraten und würde sich förderlich für die Elektromobilität auswirken. Die Automobilhersteller werden bis dahin zahlreiche Erfahrungen mit neuen Batteriesystemen in ihren Elektromobilen in bis dann vielen Millionen Elektrofahrzeugen auf den Straßen gesammelt haben.

KUNDENAKZEPTANZ

Ein für die Kundenakzeptanz förderlicher bzw. gar entscheidender Aspekt ist allgemein und ohne spezifische zeitliche gemeinte Einordnung die **Sicherheit des Fahrzeugs**. Nur wenn diese aus Kundenperspektive sichergestellt ist und bleibt, werden Elektrofahrzeuge eine nachhaltige Marktentwicklung erleben. Elektrofahrzeuge erfüllen ja bereits die mit dem EUCAR-Level gesetzten Sicherheitsanforderungen und dürften in der Gesellschaft bzw. unter potenziellen Kunden ein etwaiges Label als „nicht wirklich sicher“ sukzessive ablegen. Information und Aufklärung der Kunden über die Batterietechnologie ist hierbei parallel wichtig und schafft breites Vertrauen.

Auch die Sicherstellung, dass der eingesetzte **Strom aus erneuerbaren Energien** gewonnen wird, gilt als förderlicher Aspekt für die Elektromobilität: Letztlich ist Elektromobilität nur so umweltfreundlich, wie CO₂-Emissionen in der Herstellung und der Nutzung (Laden) vermieden werden. Angesichts der zukünftigen CO₂-Gesetzgebung wird die Notwendigkeit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien noch weiter an Bedeutung gewinnen.

Ein weiterer förderlicher Aspekt sind **monetäre Kaufanreize**, z. B. über Abschreibungen oder Steuerrabatte. Auch **nicht-monetäre Kaufanreize** wie z. B. freies Parken würden ebenfalls schon heute als fördernder Aspekt eine Rolle spielen und können von den Kommunen umgesetzt werden. Beide Aspekte bedürfen zunächst keiner spezifischen zeitlichen Einordnung,

da die Einführung solcher Anreize jederzeit ihren Effekt haben kann. Ein erster Schritt dorthin wurde durch das im Jahr 2015 in Kraft getretene Elektromobilitätsgesetz (EMoG) gegangen, welches z. B. definiert, was unter dem Begriff Elektrofahrzeug zu verstehen ist und wie diese Fahrzeuge zu kennzeichnen sind. Darüber hinaus gibt es den Kommunen vor Ort die Möglichkeit, dieses Fahrzeuge im Straßenverkehr zu privilegieren (unter anderem beim Parken oder der Nutzung von Busspuren), je nach dem für die Kommune spezifischen Bedarf.⁴³ Dabei können nicht-monetäre Anreize gleichzeitig Sonderrechte für Elektrofahrzeugbesitzer (siehe Regulierung/Gesetzgebung) sein, welche sich bei einer starken Verbreitung der Elektromobilität relativieren und dann ebenfalls langfristig als neutral zu bewerten wären. Monetäre Anreize hingegen dürften dann interessanter werden, wenn sich der Abstand (ökonomisch) zwischen konventionellen und Elektrofahrzeugen in einen Bereich entwickelt, welcher durch solche Anreize überbrückt werden und Fahrzeugkäufer zu einem Wechsel zur Elektromobilität bewegen kann. Dies kann heute für erste Kundengruppen einen Anreiz darstellen und Instrument sein, für eine breite Käuferschicht dürfte dieses Instrument allerdings zwischen 2020 und 2030 zielführend werden. Denn dann werden Elektrofahrzeuge für viele Nutzer wirtschaftlich werden und damit der Markthochlauf für Elektrofahrzeuge deutlich an Dynamik zunehmen.

Neue Mobilitätskonzepte und ein breiteres Fahrzeugangebot werden neben sinkenden Preisen zur Erreichung des weiteren Markthochlaufes ganz wesentlich sein. Mit einer größeren Breite des Fahrzeug-, aber z. B. auch des Finanzierungsangebots wird die Elektromobilität eine steigende Kundenakzeptanz erfahren.

Die **Restwertkalkulation** unter anderem der Batterie spielt langfristig eine Rolle für alle die Kunden, die ein Elektrofahrzeug finanzieren wollen: Wie viel wird das Fahrzeug nach einigen Jahren noch wert sein? Gerade in Hinsicht auf eine Fremdfinanzierung ist dieses Thema sehr wichtig, da z. B. Banken wissen möchten, wie sich ein von ihnen finanzierter Wert entwickelt. Trotz einer gewissen Relevanz wird dieser Faktor aber aus Perspektive des Marktes für Elektromobilität als neutral bewertet, der Markthochlauf wird nicht von der Restwertkalkulation abhängen.

Bis 2020 sollten Elektrofahrzeuge auf den Markt kommen, welche über höhere **Reichweiten** (Automobilhersteller nennen zunehmend BEV mit 500 Kilometer Reichweite) mit hoher Batterie-Lebensdauer (z. B. trotz Schnellladens) verfügen.

Sobald sich **Kosten, Reichweite und Ladeinfrastruktur (inkl. Strom laden)** in gleichzeitig in eine mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Dimension entwickeln kann schließlich ein Massenmarkt (jenseits 2030) entstehen.

FAHRZEUGANGEBOT

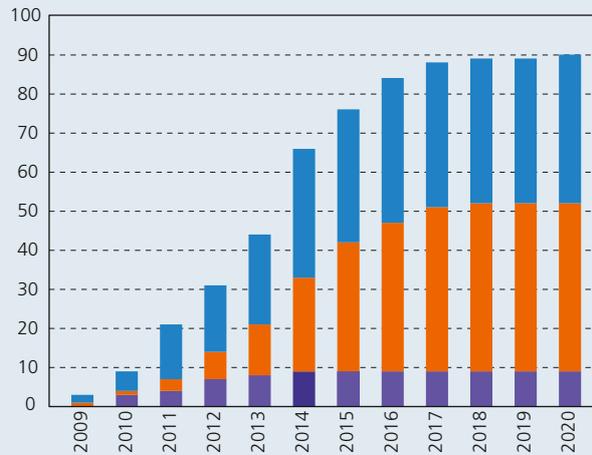
Nicht nur zur Senkung der Produktionskosten für die Automobilhersteller, sondern auch zur Steigerung der Akzeptanz ist die Schaffung eigener **Elektrofahrzeug-Plattformen**. Auch der **Fahrspaß, das Design und die Alltagstauglichkeit** haben schon heute einen großen Einfluss auf die Kaufbereitschaft und wirken sich bei einem entsprechenden Angebot förderlich für die Elektromobilität aus.

Kurzfristig wird sich eine zunehmende **Breite des Fahrzeugangebots** (über alle Klassen hinweg) ergeben. Dies zeigt die Entwicklung der von europäischen OEM eingeführten und angebotenen Elektrofahrzeugmodelle seit 2009, welche bis 2010 unter 10 Modellen lag, bis 2015 auf rund 75 Modelle gestiegen ist und bis 2020 unter Einbezug der Ankündigungen (Stand 01/2015) noch weiter ansteigen wird. Eine zukünftige Aktualisierung des Angebots und neuer Ankündigungen dürfte sicherlich zeigen, dass bis 2020 und später eine weitere zunehmende Verbreitung des Fahrzeugangebots erfolgen wird. Der in den letzten Jahren deutlich in der Abbildung zu beobachtende Ausbau des PHEV Angebots dürfte spätestens ab 2020 durch einen viel deutlicheren Ausbau des BEV Angebots dominiert werden. Das Angebot zu HEV stagniert allerdings auf der Ebene von rund 10 europäischen Modellen. Dies zeigt zugleich eine klare Strategie europäischer OEM, welche nicht auf HEV mit geringen CO₂ Einsparpotenzialen für ihre Flotten setzen, sondern zunächst vielmehr auf PHEV und zukünftig BEV. Eine Betrachtung der Fahrzeugmodelle europäischer OEM zwischen 2015 (d.h. Ausgangsbasis ist das Angebot Ende 2014) und 2020 (Stand 01/2015, aktuellere Ankündigungen nicht berücksichtigt) weist auf jeweilige Strategien einzelner Automobilhersteller hin, wobei Daimler bereits heute und BMW bis 2020 deutlich in ein breites Angebot über alle Konzepte hinweg investieren. Bei Audi ist ein starker Fokus auf PHEV zu sehen.

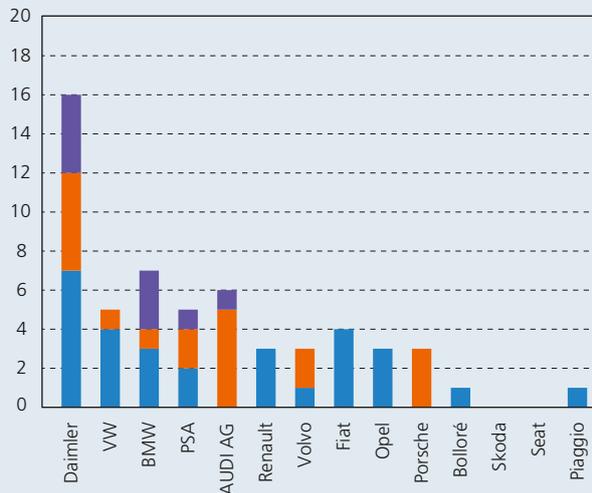
Zur erfolgreichen Vermarktung der Fahrzeuge werden aber auch **neue Geschäftsmodelle** beitragen. Bei zunehmenden Verkaufszahlen werden Fragen bzgl. des **Recyclingsprozesses und der Rücknahme von Fahrzeugbatterien** aufkommen, welche auch mit Fragen des „Second life“ zusammenfallen werden.

Schließlich wird bis 2030 aber auch eine zunehmende **Konsolidierung von Fahrzeug-, Nutzungs- und Geschäftsmodellen** erwartet, welche ebenfalls förderlich für die Elektromobilität sein wird, da sich erfolgreiche Modelle durchsetzen und das gesamte Fahrzeugportfolio weltweit in einen höheren Reifegrad kommen wird. Dies kann schließlich Ausgangspunkt für eine globale und flächendeckende Elektrifizierung werden, welche sich zwischen 2030 und 2050 schließlich realisieren lassen könnte.

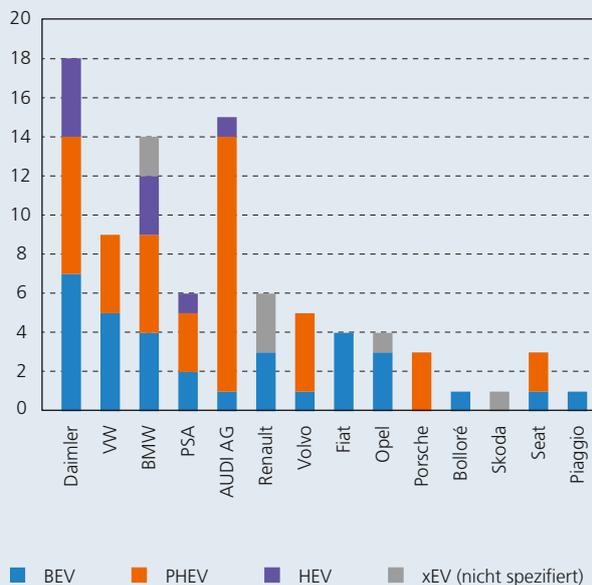
xEV Modelle Europäischer OEM bis 2015



xEV Modelle Europäischer OEM bis 2015



xEV Modelle Europäischer OEM bis 2020



FAZIT UND AUSBLICK

FAZIT

Nach einer Zeit von Pilot- und Demonstrationsfahrzeugen bis 2010 und dem Beginn eines Markthochlaufs mit bis 2015 etwas über 1 Million weltweiter Elektroautos im Bestand ist es nun an der Zeit, Elektromobilität und sich daraus ergebende Implikationen tiefergehend verstehen zu lernen, um die richtigen Maßnahmen und Entscheidungen für die Zukunft ab- und einleiten zu können. Denn der Markthochlauf entwickelt sich und Elektromobilität kommt, nur eben ein paar Jahre später als bislang erhofft.

Die „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ soll dabei helfen, diese sich abzeichnenden Entwicklungen greifbarer und verständlicher zu machen, sowohl für die Wissenschaft, Industrie und Politik als auch die interessierte Gesellschaft. Die Roadmap fasst für die seit ihrer Markteinführung wichtigsten Fahrzeugmodelle, Kernparameter und Entwicklungen bis auf Leistungsparameter der eingesetzten Batterien zusammen und erlaubt damit eine Fortschreibung zentraler Entwicklungen wie bzgl. der Energiedichte, des Batteriepreises, des Energieverbrauchs im Elektroauto, der Auslegung der Batteriegröße und Ladeinfrastruktur etc. Hierdurch lässt sich gemeinsam mit der Entwicklung der Verkaufszahlen viel greifbarer machen, wie sich Konzepte der Elektromobilität in den kommenden 10 bis 20 Jahren entwickeln können. Und dies auf Basis einer weiter optimierten Lithium-Ionen-Batterietechnologie. Eine sinnvolle Entwicklung der Elektromobilität, welche auch für die breite Bevölkerung erfahrbar und bezahlbar werden sollte, beginnt mit heute bereits zunehmend kostenoptimierten Fahrzeugen (jedoch geringer Reichweite) und führt zwischen 2020 und 2030 zu einer weiterhin in der reichweitenoptimierten Elektromobilität. Demnach müssten ein schnelles Aufladen für längere Fahrten und eine entsprechende Ladeinfrastruktur sukzessive mit der Entwicklung und dem Verkauf dieser Fahrzeuge zur Verfügung stehen, eine Aufgabe also, welche in den nächsten Dekaden noch bevorsteht. Rahmensetzende Maßnahmen sollten sich also an den Entwicklungen zu Kosten, Reichweite, und Bedarf an Infrastrukturen orientieren, welche in unterschiedlichen Zeiträumen akut werden dürften und dann vorbereitet sein sollten.

Durch die Rechnung und Illustration der Ergebnisse in Szenarien soll die Roadmap zudem ein Stück weit zeitloser sein und als ein Werkzeug dienen, da sich zukünftige Entwicklungen nun in einer etablierten Systematik einordnen und sich überprüfen lassen wird, welchem Pfad die Elektromobilität folgen wird. Auch eigene Berechnungen lassen sich auf Basis der in der Roadmap angegebenen Parameter leichter durchführen.

AKTUALISIERUNG DER ROADMAP

Die „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ ist ein lebendiges Planungsdokument. Sie wurde in dem durch das BMBF geförderte Roadmapping-Begleitvorhaben zur Innovationsallianz LIB 2015 entwickelt und wird in der Begleitmaßnahme Batterie 2020 weiterhin aktualisiert und vertieft werden. Beim Fraunhofer ISI ist eine Projektwebseite eingerichtet, um die Roadmap zu kommentieren und Anregungen für die Weiterentwicklung einfließen zu lassen. Die Roadmap kann unter dem folgenden Link heruntergeladen werden: www.isi.fraunhofer.de/prm-esemroad.php.

Die vorliegende Produkt-Roadmap wird durch die „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ und die „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ ergänzt.

BENACHBARTE PROJEKTE ZUR ELEKTROMOBILITÄT

Das Fraunhofer ISI bearbeitet eine Reihe von Forschungsprojekten rund um Energiespeichertechnologien, für die Elektromobilität und stationäre Energiespeicherung jeweils mit spezifischen Arbeitsschwerpunkten. Das Spektrum reicht von einem systemischen Ansatz mit einer Untersuchung sozio-ökonomischer Aspekte in diesen Bereichen über Fragen der Energiebereitstellung, der Ausgestaltung einer Ladeinfrastruktur und der Entwicklung von Batterie- und Fahrzeugkonzepten, Geschäftsmodellen für stationäre Speicher bis hin zu neuen Mobilitätskonzepten und der Nutzerakzeptanz.

AUSGEWÄHLTE PROJEKTE

PROJEKT	ARBEITSSCHWERPUNKTE DES FRAUNHOFER ISI	FÖRDERUNG
Roadmapping-Begleitvorhaben zur Innovationsallianz LIB 2015	Roadmapping hinsichtlich der technologie- und marktseitigen Entwicklungsmöglichkeiten für Lithium-Ionen-Batterien (LIB)	BMBF
Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)	Projekt mit Schwerpunkt Technologie-Monitoring im Rahmen der Fördermaßnahme Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)	BMBF
BEMA 2020 – Begleitmaßnahme zu Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen	Fortführung des Monitoring (EMOTOR) und Roadmapping (LIB2015) zu Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität und stationäre Anwendungen, gemeinsam mit dem Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien (KLIB) und dem Münster Electrochemical Energy Technology (MEET) der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (WWU Münster)	BMBF
Themenfeld Nutzerakzeptanz	Sozialwissenschaftlich orientierte Vernetzung von Projekten zur Kundenakzeptanzforschung	BMVBS
Innovationsreport „Systembetrachtung Elektromobilität“	Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt	TAB
Regional Eco Mobility (REM) 2030	Entwicklung eines Konzeptes für und Umsetzung einer effizienten regionalen Individualmobilität für 2030	FhG, Land Baden-Württemberg
Studie „Elektromobilität weltweit: Baden-Württemberg im internationalen Vergleich“	Benchmarking der Leistungsfähigkeit von in der Elektromobilität weltweit führenden Automobil-Regionen, zum Beispiel Aichi und Tokio in Japan oder Seoul in Südkorea	e-mobil BW GmbH
Studie „Wertschöpfungspotenziale im Leichtbau und deren Bedeutung für Baden-Württemberg“	Analyse und Darstellung der Leichtbau-Wertschöpfungsketten im Land Baden-Württemberg für ausgewählte Technologien inklusive technischer und wirtschaftlicher Potenziale und Hemmnisse für die Zukunft	Leichtbau BW GmbH
Studie „Leichtbau – Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg“	Identifikation von Anwendungsfeldern für Leichtbautechnologien und Quantifizierung von sowohl Marktgröße als auch -wachstum bis ins Jahr 2020 anhand einer breit angelegten Patent- und Publikationsanalyse	Leichtbau BW GmbH
Technologiebericht „Nanotechnologie in den Sektoren Solarenergie und Energiespeicherung“	Analyse des Einflusses von Nanotechnologie auf die zukünftige Entwicklung von Produkten und Märkten der Solarenergie und Energiespeicherung	International Electrotechnical Commission (IEC)
Studie „Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge“	Szenarientwicklung und technisch-wirtschaftliche Analyse rund um die Frage, welchen Marktanteil Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2020 haben werden, Darstellung von Hemmnissen und Treibern	acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE)
Studie „Energiespeicherung: Welche Marktdesigns und regulatorischen Anreize werden benötigt?“	Analyse des aktuellen Standes der Technik und der Potenziale von Energiespeicherung in der EU und Ableitung von Handlungsempfehlungen, welche Marktrahmenbedingungen und regulatorischen Änderungen weitere Kostensenkungen und eine breite Diffusion von Energiespeichertechnologien fördern könnten	Industry, Research and Energy Committee (ITRE) of the European Parliament

GLOSSAR

18650-Batteriezellen

Mit dieser Bezeichnung sind die in der heutigen Konsum-Elektronik als Standard eingesetzten Lithium-Rundzellen gemeint, mit 18 Millimeter Durchmesser und 65 Millimeter Länge. Von diesen Zellen werden pro Jahr mehrere Milliarden Stück hergestellt, üblicherweise mit einer Kapazität von 2,2 oder 2,6 Ah und einer Spannung von 3,7 V. Der US-amerikanische Elektrofahrzeug-Hersteller Tesla Motors Inc. verbaut in seinen Elektrofahrzeugen nach wie vor Batteriesysteme, die aus 18650-Batteriezellen bestehen.

BEV

Engl. „battery electric vehicle“, steht für ein rein batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug.

BMBF

Bundesministerium für Bildung und Forschung. Im November 2015 geleitet von Bundesministerin Prof. Dr. Johanna Wanka (CDU).

BMVI

Vormals Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), heute Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Im November 2015 geleitet von Alexander Dobrindt (CSU).

BMVBS

Siehe BMVI.

BZ

Die Brennstoffzelle repräsentiert einen Energiewandler und kann deshalb nicht für sich selbst stehen, wenn es um die stationäre Energiespeicherung geht: Das üblicherweise favorisierte System ist die sogenannte Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (engl. „proton exchange membrane fuel cell“, Abkürzung PEM-FC) als Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle, allerdings mit Stack und Wasserstoff-Tank. In dieser Aufstellung ist das System mit seinen Eigenschaften näherungsweise vergleichbar mit den anderen Energiespeichertechnologien. Es gibt verschiedene weitere Typen von Brennstoffzellen.

CO₂

Die Summenformel für Kohlenstoffdioxid, eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Kohlenstoffdioxid gilt als das wichtigste Treibhausgas, weil es für den durch die Menschheit verursachten Klimawandel verantwortlich gemacht wird und seine Emission deshalb zunehmend restriktiv eingeschränkt wird.

C-Rate

Mit der sogenannten C-Rate kann die Größe des Lade- bzw. Entladestromes unabhängig von der Kapazität verschiedener Batteriezellen angegeben werden und ist somit ein Maß dafür, wie schnell eine Batterie ge- und entladen werden kann. Die jeweils fließenden Ströme werden mit der Bezeichnung C als Bruchteile bzw. Vielfache einer vom Hersteller spezifizierten Nennkapazität angegeben. Wird beispielsweise bei einer Zelle mit einer Nennkapazität von 1000mAh die Entladerate 1 C gewählt, so fließt eine Stunde lang ein Strom von 1000mA.

Dynamische Stromtarife

Dynamische Stromtarife gelten als Kernelement des zukünftigen Energiemarktes, Preissignale, die den Kunden die Möglichkeit bieten, Vorteile aus systemorientiertem Verhalten zu ziehen. Gemäß dem Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG) bzw. Paragraph 40 zu Strom- und Gasrechnungen, Tarife wird Stromlieferanten nahegelegt, soweit technisch machbar und wirtschaftlich zumutbar, für Letztverbraucher von Elektrizität einen Tarif anzubieten, der einen Anreiz zu Energieeinsparung oder Steuerung des Energieverbrauchs setzt. Variable Tarife können im Sinne des Gesetzes insbesondere lastvariabel oder tageszeitabhängig ausgestaltet werden, woraufhin für Stromkunden in bestimmten Zeiten ein finanzieller Anreiz zur Lastverlagerung geschaffen werden soll. Dafür notwendig wird wiederum die Etablierung intelligenter Messsysteme (Stichwort: Smart meter-Rollout) sein, damit Lieferanten im Smart Grid die Datenaufzeichnung und -übermittlung von und für ihre Kunden mit relevanten verschiebbaren Stromnetzlasten leisten können.

EE

Abkürzung für Erneuerbare Energien.

Elektrolyse

Unter einer Elektrolyse wird allgemein der Prozess verstanden, bei dem in einer Redoxreaktion elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt und chemische Verbindungen gespalten werden. In Bezug auf die vorliegende Roadmap gilt als Elektrolyse vor allem ein Vorgehen zur Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser: Durch den Einsatz von elektrischer Energie wird das Wasser in den in der Natur nicht in Reinform vorkommenden Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Später kann die in den Einzelstoffen gespeicherte chemische Energie z.B. in einer Brennstoffzelle wieder in nutzbare elektrische Energie umgewandelt werden.

EU

Die Europäische Union umfasst im November 2015 28 europäische Staaten mit rund 500 Millionen Einwohnern.

EUCAR-Level

Engl. „European Council for Automotive R&D“ (EUCAR), ein großer Interessensverband der wichtigsten Automobil- und Nutzfahrzeughersteller in Europa. Gefördert und koordiniert werden vorwettbewerbliche Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit dem Ziel, die höchste Effizienz, Effektivität und Wirtschaftlichkeit in der FuE zu erreichen. Damit soll die automobilen Technologie auch weiterhin ein hohes Niveau an Lebensdauer, Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit mit einem zunehmend geringeren Umwelteinfluss zu akzeptablen Kosten erreichen.

EUCAR legt Gefährdungsstufen für elektrische Energiespeichertechnologien fest, die auf der Widerstandsfähigkeit einer Technologie angesichts von Missbrauchsbedingungen basieren. Die komplette Skala, Beschreibung sowie Klassifikationskriterien und Effekte sind in der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ im Anhang dargestellt. Hersteller und Zulieferer müssen ihre Batterien entsprechend entwickeln und testen, um das Erreichen der notwendigen EUCAR-Level sicherzustellen.

FCEV

Engl. „fuel cell electric vehicle“ ist ein Fahrzeug, in welchem das Antriebssystem auf einer Brennstoffzelle basiert, welche den Elektromotor mit Energie versorgt.

FhG

Die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. ist mit knapp 24 000 Mitarbeitern (Stand: November 2015) die größte Organisation für angewandte Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen in Europa und betreibt mehr als 80 Forschungseinrichtungen in Deutschland, davon 66 Fraunhofer-Institute.

FuE

Abkürzung für Forschung und Entwicklung.

Gesamt-Roadmap

Eine Variante des allgemeinen Begriffs Roadmap, in der es darum geht, eine Technologie-Roadmap und eine Produkt-Roadmap so zu integrieren, dass eine Lücke zwischen dem, was eine Technologie leistet (engl. „technology push“) und dem, was von einem Markt gefordert wird (engl. „market pull“) festzustellen ist und daraus entstehende Herausforderungen identifiziert werden können.

Gravimetrische Energie-/Leistungsdichte

Mit der physikalischen Größe der gravimetrischen Energie-/Leistungsdichte wird die Verteilung von Energie/Leistung (in Wh bzw. W) pro Masse eines Stoffes (in kg) bezeichnet. In diesem Sinne ist für Anwendungen wichtig, dass das Gewicht von potenziellen Energiespeichertechnologien im Vordergrund steht.

GW

Abkürzung für Gigawatt.

GWh

Abkürzung für Gigawattstunde.

H₂

Die Summenformel für Wasserstoff, ein chemisches Element mit dem Symbol H.

HE bzw. HE-LIB

Die Hochenergie-Entwicklung setzt auf Batteriematerialien mit höherer spezifischer Energie ohne dabei die Zellspannung zu erhöhen. Entsprechende Batterietechnologien befinden sich heute in der FuE und werden in den kommenden Jahren als marktreif, insbesondere für den Einsatz in Elektrofahrzeugen erwartet.

HEV

Engl. „hybrid electric vehicle“, steht für ein Hybridelektrofahrzeug, das von mindestens einem Elektromotor und einem weiteren Energiewandler (oftmals Benzin oder Diesel) angetrieben wird.

HV bzw. HV-LIB

Mit dem Begriff der Hochvolt-Entwicklung wird ganz konkret auf die Batterietechnologien hingewiesen, die ausgehend vom Referenzsystem der 4 Volt-Lithium-Ionen-Batterie bis hin zu den 5 Volt-Lithium-Ionen-Batterien entwickelt werden. Damit einher geht der Bedarf von Hochvolt-Elektroden sowie passenden Elektrolytmaterialien.

kg

Abkürzung für Kilogramm.

km

Abkürzung für Kilometer.

kW

Abkürzung für Kilowatt.

kWh

Abkürzung für Kilowattstunde.

l

Abkürzung für Liter.

LIB

Abkürzung für das elektrochemische Energiespeicherkonzept der Lithium-Ionen-Batterie.

LIB 2015

Die Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ wurde 2007 gegründet. Sie setzte sich zusammen aus rund 60 Projektpartnern aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, deren gemeinsames Ziel es war, für Fortschritt in der Forschung und Entwicklung von effizienten Lithium-Ionen-Batterien zu sorgen. Die Fördermaßnahme ist abgeschlossen.

Li-Feststoff

Lithium-Feststoff-Batterien besitzen feste Elektrolytmaterialien, welche unter anderem eine schnelle Energieaufnahme bei hoher Hitzebeständigkeit ermöglichen. Damit erspart die Lithium-Feststoff-Batterie aufwändige Kühlmechanismen und reduziert damit den Platzbedarf bei gleicher oder höherer Leistung im Vergleich mit anderen Batterietechnologien. Sie ist außerdem deutlich sicherer als heutige Lithium-Ionen-Batterien.

LFP

Engl. „lithium iron phosphate“, Lithium-Eisenphosphat (Summenformel LiFePO_4) ist ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Batteriezellen mit dieser Kathode sowie einer Anode aus Graphit bieten zwar eine geringere Energiedichte als Batterien auf Basis des herkömmlichen Kathodenmaterials Lithium-Kobaltdioxid mit der Summenformel LiCoO_2 . Weil sie aber eine längere Lebenszeit und höhere Leistungsdichte sowie eine verbesserte Sicherheit aufweisen, bieten sie auch Vorteile für den Einsatz in Elektrofahrzeugen.

Li-S

Lithium-Schwefel-Akkumulatoren besitzen eine Anode aus Lithium und eine Kathode aus Schwefel sowie Kohlenstoff, was eine sehr hohe Energiedichte ermöglicht.

LMO

Engl. „lithium manganese oxide“, Lithium-Manganoxid (Summenformel LiMn_2O_4) ist ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Vorteile existieren hinsichtlich der Kosten sowie der höheren Sicherheit. Nachteile bestehen bei der Lebensdauer.

METI

Engl. „Ministry of Economy, Trade and Industry“, das Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie von Japan. Im November 2015 geleitet von Minister Motoo Hayashi.

MW

Abkürzung für Megawatt.

MWh

Abkürzung für Megawattstunde.

NCA

Engl. „nickel cobalt aluminium (oxide)“, Abkürz. für Nickel-Kobalt-aluminium(-oxid) mit der Summenformel $\text{Li}(\text{Ni}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,05})\text{O}_2$ ist ein Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Vorteile dieses Materials bestehen in der relativ hohen Lebensdauer, der spezifischen Energie und der spezifischen Leistung, als Nachteile sind relativ hohe Kosten und ein erhöhtes Sicherheitsrisiko zu nennen.

NEDO

Engl. „New Energy and Industrial Technology Development Organization“, die größte öffentliche Organisation Japans zur Förderung von Forschung und Entwicklung an und Bereitstellung von neuen industriellen, energie- und umweltbezogenen Technologien. Der größte Teil ihres Budgets wird durch das METI zur Verfügung gestellt.

NiMH

Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren, in denen Elektroden aus Nickeloxidhydroxid und einer Wasserstoffspeicherlegierung aus Nickel und sogenanntem Mischmetall mit Seltenerdelementen zum Einsatz kommen und als Elektrolyt eine Kaliumhydroxid-Lösung verwendet wird. Ihre wichtigste Anwendung stellen Hybrid-Elektrofahrzeuge dar.

NMC

Engl. „lithium nickel manganese cobalt oxide“, Abkürzung für Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid mit der Summenformel $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ bezeichnet ein ganzes Stoffsystem. Batterien auf Basis dieses Kathodenmaterials vereinen mehrere Vorteile anderer Batterietechnologien auf sich: Die hohe Kapazität von Lithium-Kobaltoxid, die gute Hochstromfähigkeit von Lithium-Nickeloxid und die Überladestabilität sowie den Preisvorteil von Lithium-Manganoxid. Sie bieten außerdem eine hohe mittlere Entladespannung und können relativ schnell geladen werden.

NPE

Abkürzung für Nationale Plattform Elektromobilität. Ein Expertengremium, welches die deutsche Bundesregierung seit Mai 2010 berät und Empfehlungen zur Verwirklichung von Elektromobilität in Deutschland ausspricht. Setzt sich zusammen aus Vertretern der Gewerkschaften, Industrie, Politik, Verbänden und Wissenschaft.

PEM-FC

Engl. „proton exchange membrane fuel cell“.

PHEV

Engl. „plug-in hybrid electric vehicle“, steht für ein plug-in-hybrid-elektrisches Fahrzeug, ist ein Kraftfahrzeug mit Hybridantrieb, dessen Batterie zusätzlich über das Stromnetz extern geladen werden kann. Weil es oft eine größere Batterie aufweist als ein Hybridelektrofahrzeug, stellt es eine Art Mischform zwischen Letzterem und einem BEV dar.

Produkt-Roadmap

Eine Variante des allgemeinen Begriffs Roadmap, in der es darum geht, die Entwicklung der Marktanforderungen z. B. an eine bestimmte Technologie zu dokumentieren.

Roadmap

Unter einer Roadmap wird im Allgemeinen ein vorbereitender Projektplan verstanden, in dem noch auszuführende Schritte ggf. bis weit in die Zukunft verortet werden. Es gibt verschiedene Typen von Roadmaps, z. B. die Produkt-Roadmap oder die Technologie-Roadmap. Allen Roadmaps ist gemein, dass durch ihre Erstellung Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schritten und damit Risiken und Unsicherheiten aufgedeckt werden können.

Second life

Engl. „Zweites Leben“, synonym auch „Second use“, engl. „Zweitbenutzung“. Neben dem Recycling haben diese Konzepte für am Ende der Hauptnutzungsdauer zum Beispiel in der Elektromobilität angekommene Lithium-Ionen-Batterien sowohl ein großes ökologisches als auch ein ökonomisches Potenzial. Derartige Batterien haben in der Regel noch ausreichende Kapazitäten für Zweitanwendungen mit geringeren Anforderungen zum Beispiel in der stationären Energiespeicherung und können dadurch je nach Anwendung eine Lebensdauer von zwanzig Jahren und mehr erreichen. Durch die Zweitvermarktung der Batterien kann ihre Ökobilanz verbessert und es können zusätzliche Einnahmen zur Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit generiert werden.

Stack

Die in einer einzelnen Brennstoffzelle erzeugte Spannung ist relativ gering. Um die Spannung für den Betrieb in mobilen oder stationären Anwendungen zu erhöhen, werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet und bilden so einen Brennstoffzellen-Stapel, den so genannten Stack.

TAB

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag berät als selbständige wissenschaftliche Einrichtung den Deutschen Bundestag und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels.

Technologie-Roadmap

Eine Variante des allgemeinen Begriffs Roadmap, in der es darum geht, den technologischen Fortschritt zu dokumentieren.

V2G

Abkürzung für „vehicle to grid“, engl. „Fahrzeug ans Netz“, ein Konzept, in dessen Rahmen die großformatigen Batterien von Elektrofahrzeugen in Zukunft als Energiespeicher verwendet werden sollen. In Zeiten von niedriger Stromnachfrage und/oder -preisen (zum Beispiel vor- oder nachmittags) könnte zu viel produzierter Strom in Elektrofahrzeugen zwischengespeichert werden, um ihn in Zeiten von hoher Stromnachfrage und/oder -preisen (zum Beispiel mittags) wieder in das Stromnetz einzuspeisen. Als Teil des Smart Grid könnten Elektrofahrzeuge so bzw. vor allem in Standzeiten als eine Art riesiger Energiespeicher dienen. Einen großen Haken stellt in diesem Fall aber die Kompensation für die Energiespeicher-Besitzer dar, die für zusätzliche Ladezyklen bzw. Batteriealterung entschädigt werden sollten. Das gesamte Konzept macht allerdings überhaupt erst dann Sinn, wenn es eine kritische Masse an Elektrofahrzeugen in Deutschland gibt.

W

Bei Watt (W) handelt es sich um die physikalische Einheit, welche Energie pro Zeit angibt und somit zur Beschreibung einer Leistung genutzt wird.

Wh

Die Wattstunde (Wh) ist eine physikalische Einheit und dient als Maß für verrichtete Arbeit. Eine Wh ist die Energie, welche ein Energiewandler mit einer Leistung von einem Watt in einer Stunde aufnimmt oder abgibt.

xEV

Ein als Sammelbegriff bzw. -kürzel für alle (batterie-)elektrisch angetriebenen Fahrzeugkonzepte (Elektrofahrzeuge, engl. „electric vehicle“ bzw. EV) gebrauchter Term, insbesondere hybrid-elektrische Fahrzeuge (engl. „hybrid electric vehicle“ bzw. HEV), Plug-in-hybridelektrische Fahrzeuge (engl. „plug-in hybrid electric vehicle“ bzw. PHEV) und rein batterieelektrische Fahrzeuge (engl. „battery electric vehicle“ bzw. BEV).

QUELLEN

¹ ZEIT ONLINE GmbH (2015): Blog – Herdentrieb – Was passiert, wenn der Ölpreis dauerhaft niedrig bleibt. Online-Ressource, Link: http://blog.zeit.de/herdentrieb/2015/04/08/passiert-wenn-der-oelpreis-dauerhaft-niedrig-bleibt_8271, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

² WeltN24 GmbH (2015): Motor – Bundesregierung hält am Ziel fest. Online-Ressource, Link: <http://www.welt.de/motor/news/article142645003/Nationale-Konferenz-Elektromobilitaet.html>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

³ Weitere Informationen sind in der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ von Thielmann et al./ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2015) zu finden.

⁴ NEDO (2013): Battery Roadmap 2013. Online-Ressource, Link: <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015

⁵ oak media GmbH/energieportal24.de (2015): Wasserstoff als Kraftstoff. Online-Ressource, Link: http://www.energieportal24.de/fachberichte_artikel_18.htm, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

⁶ Weitere Informationen sind in der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ von Thielmann et al./ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI, 2012) zu finden.

⁷ Heise Medien GmbH & Co. KG (2015): Speicherkapazität – Power-to-Gas als klare Chance fürs Brennstoffzellenauto. Online-Ressource, Link: <http://m.heise.de/autos/artikel/Power-to-Gas-als-Chance-fuers-Brennstoffzellenauto-2689195.html>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

• Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH (2015): Probefahrt mit Toyota Mirai – Die Zukunft tankt Wasserstoff. Online-Ressource, Link: <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/autoverkehr/brennstoffzellen-auto-toyota-mirai-im-test-reichweiteverbrauch-13863614.html>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

⁸ International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015. Dies sind heutige Tankstellenpreise, langfristig werden Herstellungskosten sinken. Der Preis hängt stark von der Besteuerung ab.

⁹ Peter/myCar.net (2014): Hyundai ix35 FCEV vs. Toyota Mirai. Online-Ressource, Link: <http://www.mycar.net/auto/hyundai/ix35-fcev/442-hyundai-ix35-fcev-vs-toyota-mirai.html>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

Dies sind heutige Tankstellenpreise, langfristig werden Herstellungskosten sinken. Der Preis hängt stark von der Besteuerung ab.

¹⁰ International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹¹ Wietschel et al. (2015): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. SpringerFachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Seite 245ff.

¹² International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹³ Ministry of Economy, Trade and Industry/Agency for Natural Resources and Energy (METI, 2014): Summary of the Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: http://www.meti.go.jp/english/press/2014/pdf/0624_04a.pdf, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

• International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹⁴ International Energy Agency (IEA, 2015): Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource, Link: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹⁵ Telegraph Media Group Ltd. (2015): Hyundai ix35 Fuel Cell goes on sale – First production hydrogen fuel cell vehicle now available for the public to order – but it won't come cheap. Online-Ressource, Link: <http://www.telegraph.co.uk/cars/hyundai/news/ix35-fuel-cell-goes-on-sale/>

• Dennis Publishing Ltd. (2015): Toyota Mirai – Toyota Mirai hydrogen cars scores surprise sales hit. Online-Ressource, Link: <http://www.autoexpress.co.uk/toyota/mirai/90144/toyota-mirai-hydrogen-car-scores-surprise-sales-hit>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹⁶The Financial Times Ltd. (2015): Toyota launches hydrogen car amid VW emissions scandal. Online-Ressource, Link: <http://www.ft.com/cms/s/0/e501e0b2-7353-11e5-bdb1-e6e4767162cc.html#axzz3teOhh0a0>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹⁷International Energy Agency (IEA, 2014): Discussion – Hydrogen roadmap preliminary results & Milestones and key actions. Online-Ressource, Link: http://www.iea.org/media/workshops/2014/asiahydrogenworkshop/2.3_SessionIIKoernerIEAPreliminary-resultsandmilestonesfordiscussion.pdf, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹⁸Statista GmbH (2015): Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2015. Online-Ressource, Link: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

¹⁹Südwest Presse Online-Dienste GmbH (2011): Stuttgart – Daimler baut früher Autos mit Brennstoffzellen. Online-Ressource, Link: <http://www.swp.de/ulm/nachrichten/wirtschaft/Daimlerbaut-frueher-Autos-mit-Brennstoffzellen;art4325,988215>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

• NATURSTROM AG/energiezukunft (2015): Mobilitätskonzepte – 400 Wasserstoff-Tankstellen bis 2023. Online-Ressource, Link: <http://www.energiezukunft.eu/e-mobilitaet/mobilitaetskonzepte/400-wasserstoff-tankstellen-bis-2023-gn101520/>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

• NOW GmbH (2015): Wasserstoff tanken – Minister Dobrindt unterstützt Ausbau des Tankstellennetzes in Deutschland. Online-Ressource, Link: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/minister-dobrindt-unterstuetzt-ausbau-des-tankstellennetzes-in-deutschland>, zuletzt abgerufen am 9.12.2015

²⁰Wietschel et al./etv Energieverlag GmbH (2008): Quo vadis Elektromobilität? (Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 58. Jahrgang, Heft 12, Seiten 8-15)

²¹International Energy Agency (IEA, 2015): Global EV Outlook 2015 – key takeaways. Online-Ressource, Link: http://www.iea.org/evi/Global-EV-Outlook-2015-Update_1page.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

• MarkLines Co., Ltd. (2015): Automotive Industry Portal. Online-Ressource (Corporate Account Subscriptions), Link: http://www.marklines.com/en/customer_information, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

• Wietschel et al./etv Energieverlag GmbH (2008): Quo vadis Elektromobilität? (Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 58. Jahrgang, Heft 12, Seiten 8-15)

²²Kraftfahrt-Bundesamt (KBA, 2015): Monatliche Neuzulassungen. Online-Ressource, Link: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatliche_neuzulassungen_node.html, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Mehrere Statistiken für Deutschland und Europa von der Statista GmbH, zum Beispiel: Statista GmbH (statista, 2015): Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis zum November 2015. Online-Ressource, Link: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-deutschland/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

²³Der Einfachheit halber ist hier und im Folgenden nur nach LFP, NCA und NMC etc. (keine blends, zu deutsch „Mischungen“) differenziert. Für NCA und NMC ist daher nicht zwingend direkt auf die eingesetzte Menge der Kathodenmaterialien zu schließen. Der Trend geht ohnehin zu Kathoden ohne blends (insbesondere zu reinen NMC-Kathoden).

²⁴MarkLines Co., Ltd. (2015): Automotive Industry Portal. Online-Ressource (Corporate Account Subscriptions), Link: http://www.marklines.com/en/customer_information, zu-letzt abgerufen am 10.12.2015

Datenbank des Fraunhofer ISI, 2015.

²⁵MarkLines Co., Ltd. (2015): Automotive Industry Portal. Online-Ressource (Corporate Account Subscriptions), Link: http://www.marklines.com/en/customer_information, zu-letzt abgerufen am 10.12.2015

Datenbank des Fraunhofer ISI, 2015.

* kumuliert und hochgerechnet bis Ende 2015 auf Basis der Daten bis Juni 2015, ** aufgelöst bis auf 10 MWh, *** enthält u. a. Bolloré/BlueCar mit ca. 5000 Verkauften BEV, **** konservative Hochrechnung, tatsächliche Verkäufe können bei rund 1,2 Millionen PHEV/BEV liegen

26

BEV

• BMW i3

BMW AG (2015-1): Technische Daten. Online-Ressource, Link: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/3/2015/techdata.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

BMW AG (2015-2): Kaufen & Kosten. Online-Ressource (Preisliste), Link: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/3/2015/kaufen-kosten.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

• Daimler Fortwo

Guy Weemaes/GoingElectric (2013): smart fortwo electric drive. Online-Ressource, Link: <http://www.goingelectric.de/elektroautos/smart-fortwo-electric-drive/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Daimler AG (2015): Umweltbroschüre – smart fortwo electric drive. Online-Ressource, Link: <https://www.daimler.com/bilder/nachhaltigkeit/produkt/umweltzertifikate/2243138-umweltbrosch-re-smart-fortwo-electric-drive.pdf>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Renault ZOE

WeltN24 GmbH (2013): RENAULT ZOE – Die letzte Chance für das Elektroauto. Online-Ressource, Link: <http://www.welt.de/motor/article114628283/Die-letzte-Chance-fuer-das-Elektroauto.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Renault Deutschland AG (2015): Der neue Renault http://www.renault-preislisten.de/fileadmin/user_upload/Preisliste_Zoe.pdf. Kleinstes Modell (Life) gewählt!

- Fiat 500e

Axel Springer Auto Verlag GmbH (2013): Offizieller Elektro-500. Online-Ressource, Link: <http://www.autobild.de/artikel/la-auto-show-2012-fiat-500e-3717180.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

FCA US LLC (2015): 2015 500e (Available Only in CA and OR). Online-Ressource, Link: <http://www.fiatusa.com/hostc/bmo/CUX201504/models.do?>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Nissan Leaf

Nissan International S.A. (2011): The Age of Electric Motoring Begins in Europe – 100% electric Nissan LEAF arrives onboard new energy-saving ship. Online-Ressource, Link: http://newsroom.nissan-europe.com/media/articles/html/75281_1_9.aspx, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Unister GmbH/auto.de (2011): Nissan – Nissan Leaf für 36 990 € ab April 2012 in Deutschland. Online-Ressource, Link: <http://www.auto.de/magazin/Nissan-Leaf-fuer-36-990-Euro-ab-April-2012-in-Deutschland/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Unister GmbH/auto.de (2011): Nissan Leaf ist auch in Japan „Auto des Jahres“. Online-Ressource, Link: <http://www.auto.de/magazin/nissan-leaf-ist-auch-in-japan-auto-des-jahres/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Nissan Center Europe GmbH (2015): Nissan Leaf – zero Emission. Online-Ressource, Link: <http://www.nissan.de/content/dam/services/DE/brochure/104602.pdf>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Mitsubishi iMiEV

Mitsubishi Motors Corporation (2011): Mitsubishi i-MiEV startet in Deutschland. Online-Ressource, Link: http://presse.mitsubishi-motors.de/produktinfo/imiev/pdf/iMiEV_langfassung.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

MMD Automobile GmbH (2015): iMiEV – Electric Vehicle – Geräuschlos und emissionsfrei. Online-Ressource, Link: <http://www.mitsubishi-motors.de/Electric-Vehicle/#!>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Mitsubishi Minicab-MiEV

Mitsubishi Motors Corporation (2011): Mitsubishi Motors to Launch New MINICAB-MiEV Commercial Electric Vehicle in Japan – Prices start from ¥1,730,000 after application of eco-car subsidy.

Online-Ressource, Link: http://www.mitsubishi-motors.com/publish/pressrelease_en/products/2011/news/detail0817.html, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Tesla Model S

Guy Weemaes/GoingElectric (2012): Offiziell: Preis für Model S in Deutschland. Online-Ressource, Link: <http://www.goingelectric.de/2012/12/20/news/tesla-model-s-preis-deutschland-offiziell/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Tesla Motors Inc. (2015): Model S – Keine Emissionen – Keine Kompromisse. Online-Ressource, Link: http://www.teslamotors.com/de_DE/models, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Ford Focus

Dow Jones & Company, Inc./The Wall Street Journal (2012): Ford Reveals How Much Electric-Car Batteries Cost. Online-Ressource, Link: <http://blogs.wsj.com/drivers-seat/2012/04/17/ford-reveals-how-much-electric-car-batteries-cost/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Ford-Werke GmbH (2015): Der neue Ford Focus Electric. Online-Ressource, Link: <http://www.ford.de/Pkw-Modelle/FordFocus-Electric>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Chevrolet Spark

Axel Springer Auto Verlag GmbH (2012): Neue Bilder vom Elektro-Mini. Online-Ressource, Link: <http://www.autobild.de/artikel/chevrolet-spark-ev-la-auto-show-2012-update-3720150.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

General Motors Company (2015): The 2016 Spark EV – Electrify Your Ride. Online-Ressource, Link: <http://www.chevrolet.com/spark-ev-electric-vehicle.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Chery QQ3, Chery eQ

CarNewsChina.com (2014): Chery eQ EV launched on the Chinese car market. Online-Ressource, Link: <http://www.carnewschina.com/2014/11/05/chery-eq-ev-launched-on-the-chinese-car-market/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

ChinaAutoWeb.com (2015): Chery eQ EV (QQ EV). Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/chery-eq-ev/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- BAIC E150

ChinaAutoWeb.com (2015): BAIC E150 EV. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/baic-e150-ev/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Gasgoo.com Corporation (2015): BAIC E150 EV to make market debut by end of 2012, eligible for savings of 120000 yuan. Online-Ressource, Link: <http://autonews.gasgoo.com/china-news/baic-e150-ev-to-make-market-debut-by-end-of-2012-120531.shtml>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Zotye E20

ChinaAutoWeb.com (2015): Zotye Zhidou (ZD) E20 EV. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/zotye-zhidou-zd-e20-ev/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- BYD e6

The New York Times Company (2013): Automobiles – From

China to Los Angeles, Taking the Electric Bus. Online-Ressource, Link: http://www.nytimes.com/2013/10/30/automobiles/from-china-to-los-angeles-taking-the-electric-bus.html?_r=3&, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

ChinaAutoWeb.com (2015): BYD E6. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/byd-e6/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Zotye Cloud 100

Zotye International Automobile Trading Co., Ltd. (2014): Zotye Launched Cloud 100 EV. Online-Ressource, Link: <http://www.zotyeglobal.com/news/Cloud%20100%20Launched.htm>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

ChinaAutoWeb.com (2015): Zotye Cloud 100 (Z100) EV. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/zotye-cloud-100-ev/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Geely-Kandi Panda, Kandi EV

CarNewsChina.com (2014): Spy Shots: Geely GLEagle Panda goes electric in China. Online-Ressource, Link: <http://www.carnewschina.com/2014/05/27/spy-shots-geely-gleagle-panda-goes-electric-in-china/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

ChinaAutoWeb.com (2015): Kandi K11 EV (Geely-Kandi Panda EV). Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/kandi-k11-ev-geely-kandi-panda-ev/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- JAC iEV

China Anhui Jianghuai Automobile Co., Ltd. (JAC, 2015): JAC Electric Vehicle – Innovative Technology, Green Living – The History of JAC New Electric Vehicle. Online-Ressource, Link: <http://jacen.jac.com.cn/showroom/iev.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

ChinaAutoWeb.com (2015): JAC J3 EV („iev“). Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/jac-tojoy-ev-j3/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

ChinaAutoWeb.com (2015): JAC iEV. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/jac-iev/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

PHEV

- VW/Porsche Panamera

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (2015): Panamera S E-Hybrid – Die Kraft der Gegensätze. Online-Ressource (Preisliste), Link: <http://www.porsche.com/germany/models/panamera/panamera-s-e-hybrid/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- VW/Porsche Cayenne

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (2015): Cayenne S E-Hybrid – Enthusiasmus. Gesteigert. Online-Ressource (Preisliste), Link: <http://www.porsche.com/germany/models/cayenne/cayenne-s-e-hybrid/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- BMW i8

Axel Springer Auto Verlag GmbH (2014): Das kostet der BMW i8. Online-Ressource, Link: <http://www.autobild.de/artikel/bmw-i8-preis-5064684.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

BMW AG (2015-1): Technische Daten. Online-Ressource, Link:

http://www.bmw.com/com/de/newvehicles/i/i8/2014/showroom/technical_data.html, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- VW/Audi A3

Audi AG (2015): A3 Sportback e-tron – Verändert die Welt. Nicht den Alltag. Online-Ressource, Link: <http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/a3/a3-sportback-e-tron.html#>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- VW Golf

Volkswagen AG (2015): Produktbroschüren. Online-Ressource, Link: <http://www.volkswagen.de/de/models/golf-gte/brochure/catalogue.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- VW/Porsche 918

FutureCars.com (2011): Porsche Taking Pre-Orders for 918 Spyder PHEV at Under \$1M. Online-Ressource, Link: <http://www.futurecars.com/news/hybrid-cars/porsche-taking-pre-orders-for-918-spyder-phev-at-under-1m>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Ziff Davis, LLC/Extreme Tech (2012): Save money (on energy costs) with \$845,000 Porsche 918 plug-in hybrid. Online-Ressource, Link: <http://www.extremetech.com/extreme/123387-save-money-on-energy-costs-with-845000-porsche-918-plug-in-hybrid>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Porsche Cars North America, Inc. (2015): Technology – Electric drive. Online-Ressource, Link: <http://917.porsche.com/microsite/918/usa.aspx?ws=1#chapter-electricdrive>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Daimler S-Klasse

Spiegel Online GmbH (2014): Autogramm Mercedes S500 Plug-in-Hybrid – Sparen als Luxus. Online-Ressource, Link: <http://www.spiegel.de/auto/fahrberichte/mercedes-s500-plug-in-hybrid-s-klasse-mit-stromanschluss-im-test-a-991857.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Daimler AG (2015): S-Klasse Limousine – Vision erfüllt. Die S-Klasse. Online-Ressource, Link: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/s-class/w222.html, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- VW XL1

The Enthusiast Network, Inc./MotorTrend (2013): 2013 Volkswagen XL1 First Drive – Winged Victory – Hybrid Supercar Could Reach 209 MPG. Online-Ressource, Link: http://www.motortrend.com/roadtests/alternative/1306_2013_volkswagen_xl1_first_drive/, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Volkswagen of America, Inc. (2013): The Volkswagen XL1 Hits the Streets of New York. Online-Ressource, Link: <http://media.vw.com/release/586/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Toyota Prius

Dennis Paschke/Green-Motors.de (2012): Toyota Prius PHV – Plug-in-Hybrid in Deutschland ab 36.200 Euro. Online-Ressource, Link: <http://www.green-motors.de/news/1206221081-toyota-prius-phv-plug-in-hybrid-in-deutschland-ab-36200-euro>, zuletzt abgerufen 10.12.2015

Toyota Deutschland GmbH (2015): Prius Plug-in Hybrid – Toyota Hybrid. Im Prius Plug-in Hybrid sogar noch besser. Online-Ressource, Link: <https://www.toyota.de/automobile/prius-plug-in/index.json>, zuletzt abgerufen 10.12.2015

- Mitsubishi Outlander

MMD Automobile GmbH (2013): Deutschlandpremiere des Mitsubishi Outlander PHEV auf der IAA. Online-Ressource, Link: <http://presse.mitsubishi-motors.de/press.php?id=201308220>, zuletzt abgerufen 10.12.2015

Handelsblatt GmbH (2015): Mitsubishi Outlander PHEV – 100.000 Kilometer mit einer Tankfüllung. Online-Ressource, Link: <http://www.handelsblatt.com/auto/test-technik/handelsblatt-autotest/mitsubishi-outlander-phev-100-000-kilometer-mit-einer-tankfuellung/11057610.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

MMD Automobile GmbH (2015): Plug-in Hybrid Outlander – Er ist einzigartig. Aber das dreimal. Die Ausstattungsvarianten. Online-Ressource, Link: <http://www.greenmobility-mitsubishi.de/pluginhybridoutlander>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Axel Springer Auto Verlag GmbH (2014): Outlander PHEV günstiger. Online-Ressource, Link: <http://www.autobild.de/artikel/mitsubishi-outlander-phev-preis-gesenkt-5039075.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Honda Accord

Honda Motor Co., Ltd. (2011): News Releases 2011 – Honda Geneva 2011 – A Revisited Jazz with a New CVT Gearbox. Online-Ressource, Link: <http://world.honda.com/news/2011/4110301Geneva-2011/index.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Hearst Communications, Inc./Car and Driver (2013): 2014 Honda Accord Plug-In Hybrid. Online-Ressource, Link: <http://www.caranddriver.com/reviews/2014-honda-accord-plug-in-test-review>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

NetCarShow.com (2014): Honda Accord PHEV (2014). Online-Ressource, Link: http://www.netcarshow.com/honda/2014-accord_phev/, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Electric Cars (2015): 2015 Honda Accord PHEV Price And Specs. Online-Ressource, Link: <http://electriccars2016.com/2015-honda-accord-phev-price-specs/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- McLaren P1

EVWorld.com, Inc. (2013): Press Release – McLaren Delivers First P1 Electric Hybrid Supercar. Online-Ressource, Link: <http://evworld.com/news.cfm?newsid=31564>, zuletzt abgerufen 10.12.2015

- Chevrolet Volt

Cadillac Europe GmbH (2010): Markteinführung des Chevrolet Volt startet 2010 in Kalifornien und Michigan. Online-Ressource, Link: http://media.gm.com/media/de/de/chevrolet/news_detail.html/content/Pages/news/de/de/2010/CHEVROLET/03_02_presskit_chevrolet_volt.html, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

oxmo GmbH & Co. KG/Elektroauto-Nachrichten.de (2010): Chevrolet Volt ist teuer. Online-Ressource, Link: <http://www.elektroauto-nachrichten.de/elektroauto-hersteller/chevrolet/chevrolet-volt-ist-teuer/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

oxmo GmbH & Co. KG/Elektroauto-Nachrichten.de (2011): Chevrolet Volt kommt nach Deutschland. Online-Ressource, Link: <http://www.elektroauto-nachrichten.de/elektroauto-hersteller/chevrolet/chevrolet-volt-kommt-nach-deutschland/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

General Motors Company (2015): The 2015 Volt – Electricity Travels. Online-Ressource, Link: http://www.chevrolet.com/2015-volt-electric-car.html#how_volt_works, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Cadillac ELR

Kinja KFT/Jalopnik (2009): Cadillac Converj Concept – A Volt for Cadillac. Online-Ressource, Link: <http://jalopnik.com/5128642/cadillac-converj-concept-a-volt-for-cadillac>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

General Motors Company (2015): 2016 ELR Coupe. Online-Ressource, Link: <http://www.cadillac.com/coupes/elr-coupe.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Internet Brands, Inc./The Car Connection (2015): \$75,000 Cadillac ELR Coupe Price Was Too High, Exec Admits. Online-Ressource, Link: http://www.thecarconnection.com/news/1098338_75000-cadillac-elr-coupe-price-was-too-high-exec-admits, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Recargo, Inc./plugincars (2015): Cadillac ELR Review – Cadillac ELR Luxury Plug-in Hybrid with Steep Price. Online-Ressource, Link: <http://www.plugincars.com/cadillac-elr>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Ford C-MAX

Electric Auto Association/Plug In America (2013): Ford C-Max Energi. Online-Ressource, Link: <http://www.pluginamerica.org/vehicles/ford-c-max-energi>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

Ford Motor Company (2015): Models – Hybrid SE, Hybrid SEL, Energi. Online-Ressource, Link: <http://www.ford.com/cars/cmax/models/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Ford Fusion

The New York Times Company (2012): Wheels – The Nuts and Bolts of Whatever Moves You – Ford Adds Plug-In Hybrid to Fusion Arsenal. Online-Ressource, Link: <http://wheels.blogs.nytimes.com/2012/01/09/ford-adds-plug-in-hybrid-to-fusion-arsenal/?ref=automobiles&r=0>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- GM Ampera

Adam Opel AG (2014): Opel Ampera – Preise, Ausstattungen und technische Daten, 2. Juni 2014. Online-Ressource, Link: http://www.opel.de/content/dam/Opel/Europe/germany/nscwebsite/de/01_Vehicles/01_PassengerCars/Ampera/katalog/Ampera_PRL-15%200_D_web.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Fisker Karma

Fisker Automotive, Inc. (2011): Karma 2011 – Preisliste (gültig ab 01.02.2011). Online-Ressource, Link: <http://www.fisker->

automobile.com/fileadmin/media/pdf/Preislisten/D_Preisliste_Fisker_Karma_2011_01022011_d.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

AxelSpringerAutoVerlagGmbH(2012):DaskostetderFiskerKarma. Online-Ressource, Link: <http://www.autobild.de/artikel/fisker-karma-preise-2799446.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Geely S60/V60 (Volvo Cars)

John Mellor Pty Ltd./GoAuto.com.au (2012): Future Models – Volvo 2014 V60 – Volvo turns up wick on plug-in V60. Online-Ressource, Link: <http://www.goauto.com.au/mellor/mellor.nsf/story2/0710B1B32DC2206ECA257ABC0007BBDO>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

The Motley Fool, LLC. (2013): Volvo's New Plug-In Hybrid Is a Game-Changer. Online-Ressource, Link: <http://www.fool.com/investing/general/2013/08/31/the-new-volvo-plug-in-hybrid-is-a-game-changer.aspx>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

EVWorld.com, Inc. (2014): Syndicated News – China's Geely, Sweden's Volvo Discuss Electric Car R&D Joint Venture. Online-Ressource, Link: <http://evworld.com/news.cfm?newsid=32887>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- BYD Qin

BYD Company Ltd. (2015): Specs. Online-Ressource, Link: <http://www.byd.com/la/auto/qin.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- BYD Tang

ChinaAutoWeb.com (2015): BYD Tang. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/byd-tang/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

BYD Company Ltd. (2015): The BYD Tang SUV is Available for Pre-orders. Online-Ressource, Link: <http://www.byd.com/news/news-271.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- SAIC Roewe 550

ChinaAutoWeb.com (2015): SAIC Roewe 550 Hybrid. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/saic-roewe-550-hybrid/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

SAIC Motor Corporation Ltd. (2015): China's first mass-production plug-in hybrid vehicle. Online-Ressource, Link: http://www.saicmotor.com/english/latest_news/roewe/28763.shtml, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- BYD F3DM

The New York Times Company (2011): Behind the Wheel – BYD F3DM – BYD Is the First Ripple in a Potential Chinese Wave. Online-Ressource, Link: <http://www.nytimes.com/2011/02/20/automobiles/autoreviews/byd-f3-dm-review.html?pagewanted=all>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

BYD Company Ltd. (2015): Specs. Online-Ressource, Link: <http://www.byd.com/la/auto/f3dm.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

ChinaAutoWeb.com (2015): BYD F3DM. Online-Ressource, Link: <http://chinaautoweb.com/car-models/byd-f3dm/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

²⁷ Anmerkungen zur Tabelle insgesamt: Es wurde für jedes Elektrofahrzeug-Modell die jeweils kleinste Batterieausführung bzw. -kapazität ausgewählt, falls mehrere Varianten zum Kauf angeboten werden. Die Preise gelten allesamt inklusive MWSt., allerdings ohne Rabatte oder Steuervergünstigungen, die länderabhängig unterschiedlich hoch ausfallen können bzw. teilweise gar nicht angeboten werden.

Anmerkung zu Tesla Model S: Bei der Markteinführung kostete das Modell mit der kleinsten Batterieausführung von 60 kWh 71 400 €, im Jahr 2015 kostete die kleinste Batterieausführung von 70 kWh 83 500 Euro.

²⁸ IHS Automotive (IHS, 2014): November 2014 – Green Automotive Future. Online-Ressource, Link: <http://www.automotive-components.lu/wp-content/uploads/IHS-Automotive-Green-Automotive-Future-AutomotiveDay.pdf>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015. Die Werte für 2015 bis 2020 wurden bis 2025 fortgeschrieben

- Anderman/Advanced Automotive Batteries (AAB, 2013): Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles: The xEV Industry Insider Report (2nd Edition). Online-Ressource (Studie zum Kauf, Stand: Oktober 2015), Link: <http://www.totalbatteryconsulting.com/industry-reports/xEV-report/ordering-information.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015. Die Werte für 2015 bis 2020 wurden bis 2025 fortgeschrieben

- avicenne ENERGY (2015): Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: http://www.avicenne.com/articles_energy.php, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

²⁹ Yano Research Institute Ltd. (2015): Global xEV Batteries Market: Key Research Findings 2014. Online-Ressource, Link: <http://www.yanoresearch.com/press/press.php/001346>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

- Anderman/Advanced Automotive Batteries (AAB, 2013): Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles: The xEV Industry Insider Report (2nd Edition). Online-Ressource (Studie zum Kauf, Stand: Oktober 2015), Link: <http://www.totalbatteryconsulting.com/industry-reports/xEV-report/ordering-information.html>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015. Die Werte für 2015 bis 2020 wurden bis 2025 fortgeschrieben

- IHS Automotive (IHS, 2014): November 2014 – Green Automotive Future. Online-Ressource, Link: <http://www.automotive-components.lu/wp-content/uploads/IHS-Automotive-Green-Automotive-Future-AutomotiveDay.pdf>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015. Die Werte für 2015 bis 2020 wurden bis 2025 fortgeschrieben

- avicenne ENERGY (2015): Lithium-Ion Battery Market Expansion Beyond Consumer and Automotive. Online-Ressource (Registrierung erforderlich), Link: http://www.avicenne.com/articles_energy.php, zuletzt abgerufen am 3.12.2015

- IBT Media Inc. (2015): Business – A Chinese ‘Gigafactory’? BYD Says It Could Have Battery Production Capacity Roughly Equal To Tesla Motors In 2020. Online-Ressource, Link: <http://www.ibtimes.com/chinese-gigafactory-byd-says-it-could-have-battery-production-capacity-roughly-equal-1847002>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015
- Seeking Alpha, Ltd. (2014): The Lithium-Ion Battery Megafactories Are Coming: Production To More Than Triple By 2020. Online-Ressource, Link: <http://seekingalpha.com/instablog/27130533-kirill-klip/3984806-the-lithium-ion-battery-megafactories-are-coming-production-to-more-than-triple-by-2020>, zuletzt abgerufen am 4.12.2015
- Tesla Motors Inc. (2014): Planned 2020 Gigafactory Production Exceeds 2013 Global Production. Online-Ressource, Link: www.teslamotors.com/sites/default/files/blog_attachments/gigafactory.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³⁰ Auswertung über die gelisteten Modelle hinweg und Vergleich zur Zeit der Markteinführung und im Jahr 2015 (siehe Tabelle auf Seite 17).

³¹ Guy Weemaes/GoingElectric (2013): Tesla: Batteriekosten fallen unter 180 €/kWh. Online-Ressource, Link: <http://www.goingelectric.de/2013/08/10/news/tesla-model-s-batterie-kosten-180-euro-kilowattstunde/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³² ecomento UG (haftungsbeschränkt) (2015): Tesla – Ab jetzt Kompakt-Elektroauto Model 3 im Fokus. Online-Ressource, Link: <http://ecomento.tv/2015/10/20/tesla-konzentration-auf-elektroauto-model-3/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³³ Nationale Plattform Elektromobilität (NPE, 2015): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland – Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015. Online-Ressource, Link: http://nationale-plattform-elektromobili-taet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³⁴ European Commission (2015): Reducing CO2 emissions from passenger cars – Policy. Online-Ressource, Link: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³⁵ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV, 2014): FAQ-Liste der AG „Handlungsrahmen Elektromobilität“ (Stand: 12. Februar 2014). Online-Ressource, Link: http://www.dguv.de/medien/inhalt/praevention/themen_a_z/elektromobilitaet/faq_elekro.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³⁶ WEKA FACHMEDIEN GmbH/elektroniknet.de (2014): Batterien und Akkus – Sicherer Transport von Li-Ionen-Batterien. Online-Ressource, Link: <http://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/114462/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³⁷ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, 2014): Gemeinsame Pressemitteilung mit dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – Kabinett verabschiedet Elektromobilitätsgesetz. Online-Ressource, Link: <http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/kabinett-verabschiedet-elektromobilitaetsgesetz/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³⁸ California Environmental Protection Agency (CEPA, 2015): Zero Emission Vehicle (ZEV) Program. Online-Ressource, Link: <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm>, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

³⁹ European Commission (2015): Reducing CO2 emissions from passenger cars – Policy. Online-Ressource, Link: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

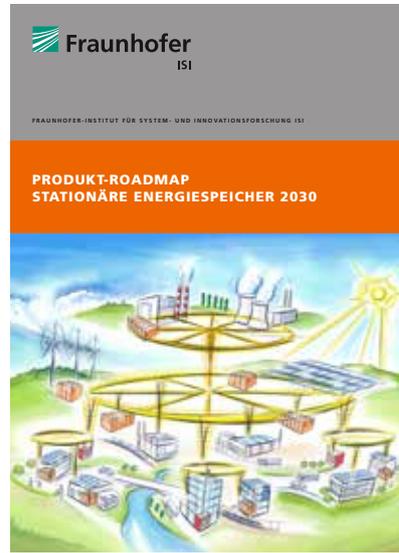
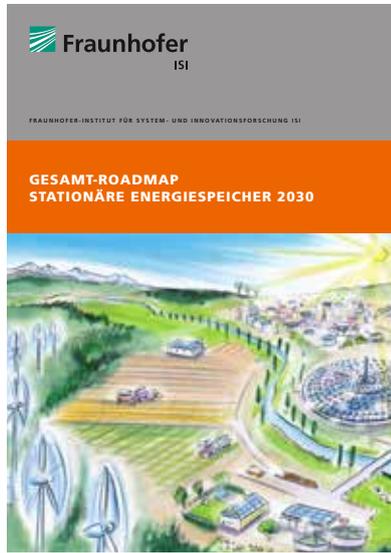
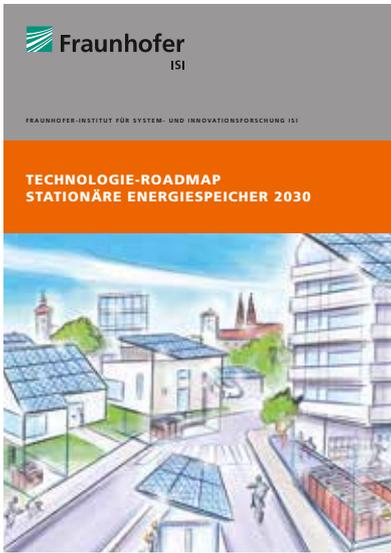
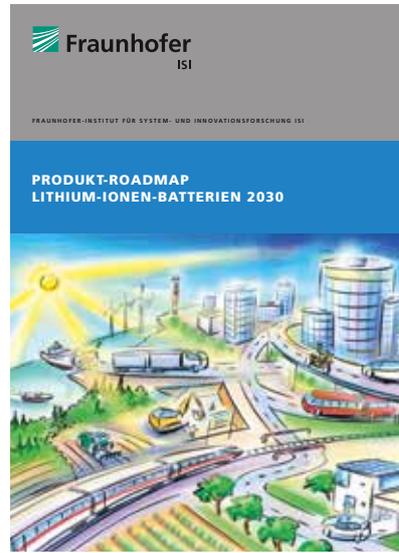
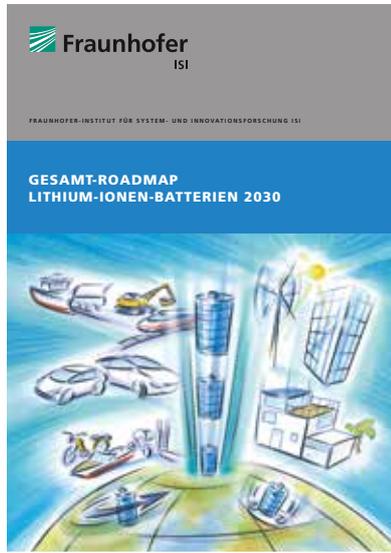
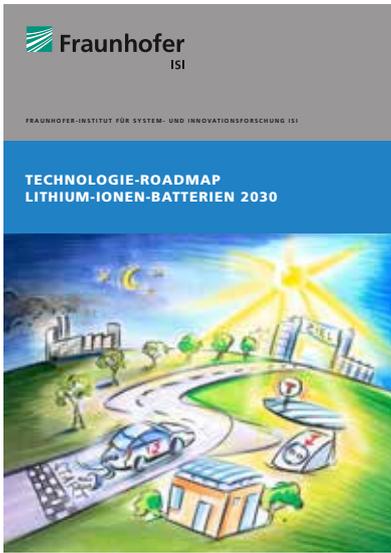
⁴⁰ Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE)/Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (DKE) (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Online-Ressource, Link: http://schaufenster-elektromobili-taet.org/media/media/documents/dokumente_der_begleit_und_wirkungsforschung/Kompendium_Li-Ionen-Batterien.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

⁴¹ Nationale Plattform Elektromobilität (NPE, 2012): Die deutsche Normungs-Roadmap – Elektromobilität – Version 2. Online-Ressource, Link: https://www.dke.de/de/std/Documents/E-Mobility_Normungsroadmap_V2.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

⁴² Bender GmbH & Co. KG (2015): Elektrische Sicherheit für die Elektromobilität. Online-Ressource, Link: https://www.bender.de/fileadmin/products/b/d/Emobility_PROSP_de.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

⁴³ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, 2015): Infopapier Elektromobilitätsgesetz. Online-Ressource, Link: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/informationspapier-elektromobilitaetsgesetz.pdf?_blob=publicationFile, zuletzt abgerufen am 10.12.2015

LIB-ROADMAPPING AM FRAUNHOFER ISI



IMPRESSUM

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
info@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de
Projektleitung: Dr. Axel Thielmann

Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat 511, Neue Werkstoffe, Nanotechnologie
53170 Bonn
www.bmbf.de

Projekträger

Projekträger Jülich
Geschäftsbereich Neue Materialien und Chemie, NMT
52425 Jülich
www.fz-juelich.de

Autoren

Dr. Axel Thielmann
Andreas Sauer
Prof. Dr. Martin Wietschel

Gestaltung

G+S Büro für Grafik und Satz Roswitha Tuz, Karlsruhe

Illustrationen

Heyko Stöber, Hohenstein

Kontakt

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI
Competence Center Neue Technologien
Dr. Axel Thielmann
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-299
Fax +49 721 6809-315
axel.thielmann@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI,
Karlsruhe, Dezember 2015

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI analysiert Entstehung und Auswirkungen von Innovationen. Wir erforschen die kurz- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Auf dieser Grundlage stellen wir unseren Auftraggebern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft Handlungsempfehlungen und Perspektiven für wichtige Entscheidungen zur Verfügung. Unsere Expertise liegt in der fundierten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.

Heute beschäftigt das Fraunhofer ISI rund 240 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, darunter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, die pro Jahr an rund 370 Forschungsprojekten arbeiten. Das jährliche Budget, knapp 23 Millionen Euro im Jahr 2014, wird vornehmlich durch Aufträge der nationalen und internationalen öffentlichen Hand, aus der Wirtschaft sowie von Stiftungen und Wissenschaftsorganisationen eingenommen.

Als international führendes Innovationsforschungsinstitut pflegen wir einen intensiven wissenschaftlichen Dialog mit den USA, Japan sowie den BRICS-Ländern, beispielsweise durch den Austausch von Gastwissenschaftlern.

Das Fraunhofer ISI arbeitet eng mit seinen Partnern, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), der Universität Kassel, der Universität Straßburg, der ETH Zürich, dem Virginia Tech in den USA und dem Institute of Policy and Management (IPM) in Peking zusammen.

